

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí

Prostorová příhradová konstrukce zastřešení středního rozpětí

Middle Span Spatial Lattice Roof Structure

Student:

Bc. Adéla Golková

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Miroslav Rosmanit, Ph.D

Ostrava 2019

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Adéla Golková**
Studijní program: N3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3607T037 Konstrukce staveb
Téma: **Prostorová příhradová konstrukce zastřešení středního rozpětí.
Middle Span Spatial Lattice Roof Structure**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

V rámci diplomové práce vypracujte:

1. Prostorové příhradové konstrukce - řešerše současného stavu, způsoby využití.
2. Typické detaily prostorových příhradových konstrukcí, specifiká návrhu.
3. Volba dispozice objektu středního rozpětí (min. 40-80 m), specifikace požadavků.
4. Předběžné posouzení základních nosných prvků navržené konstrukce zastřešení, základní variantní řešení. Zhodnocení výhod a nevýhod navržených konstrukcí.
5. Statický výpočet rozhodujících nosných prvků a ztužení konstrukce s využitím software.
6. Návrh a posouzení vybraných spojů.
7. Dispoziční a architektonické řešení, základní výkresová dokumentace (část projektové dokumentace pro stavební řízení).
8. Základní postup montáže navržených konstrukcí, technologický postup.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí.
- [2] ČSN EN 1991: Zatížení konstrukcí.
- [3] ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- [4] ČSN EN 1993-1-1: Navrhování ocelových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- [5] ČSN EN 1993-6: Navrhování ocelových konstrukcí. Část 6: Jeřábové dráhy
- [6] Studnička, J., Macháček, J. Voříška, L.: Ocelové konstrukce 20 – Pozemní stavby, Praha 1998
- [7] Wald, F., Sokol, S.: Navrhování styčníků, Praha, 1998.
- [8] Odborné časopisy – Konstrukce, Stavitel, Structural Engineering, Stahlbau
- [9] Internet

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Rosmanit, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2019

Datum odevzdání: 29.11.2019



doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Bc. Adéla Golková

Prohlašuji, že

- byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....
Bc. Adéla Golková

Anotace

GOLKOVÁ, Adéla. *Prostorová příhradová konstrukce zastřešení středního rozpětí*. Ostrava, 2019. 164 stran formátu A4. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Fakulta stavební. Katedra konstrukcí. Vedoucí práce ROSMANIT, Miroslav.

Stěžejním úkolem diplomové práce je zhodnocení a posouzení prostorové příhradové konstrukce zastřešení tribuny. Práce popisuje základní princip fungování příhradových konstrukcí, jejich statické působení a široké využití v praxi dnes i v minulosti. Podrobně se zabývá popisem styčníků, které jsou u příhrad velmi specifické a zásadně ovlivňují fungování celé konstrukce. Dále je zde popsáno řešení dispozice tribun s důrazem na viditelnost. Ukázány jsou různé možnosti zastřešení. Řešená stavba je podrobně popsána včetně jejího usazení do terénu. Statický posudek zahrnuje výpočet zatížení, popis numerického modelu i posouzení dle platných norem na mezní stav únosnosti (dále jen MSÚ) a použitelnosti (dále jen MSP). Podrobně je analyzován jeden ze styčníků. Je zde popsán základní montážní postup. Konstrukce je zavedena ve výkresové dokumentaci.

Klíčová slova

Prut, prostorová příhradová konstrukce, styčník, tah, tuhost, tlak.

Abstract

GOLKOVÁ, Adéla. *Middle Span Spatial Lattice Roof Structure*. Ostrava, 2019. 164 A4 pages. Thesis. VŠB – Technical University of Ostrava. Faculty of Civil Engineering. Department of structures. Supervisor ROSMANIT, Miroslav.

The main task of the thesis is to evaluate and assess the space truss of the grandstand roof. The work describes the basic principle of operation of space trusses, their static effect and wide use in practice today and in the past. It describes in detail the joints, which are very specific at the space trusses and fundamentally affect the functioning of the entire structure. Then there is described the layout of the stands and the emphasis on visibility. Various

roofing options are shown. The construction is described in detail, including its location and settlement into the terrain. Static check includes calculation of load, description of numerical model and check according to valid standards for ultimate limit state (hereinafter referred to as USL) and serviceability (hereinafter referred to as SLS). The basic assembly procedure is described here. The structure is introduced in the drawings.

Key words

Member, space truss, joint, tension, stiffness, pressure.

Obsah

1	Úvod	9
2	Příhradové konstrukce	9
2.1	Princip	9
2.2	Uspořádání a statické působení	10
2.3	Prostorové příhradové konstrukce z oceli	11
2.3.1	Důvod využití	11
2.3.2	Historie	13
2.3.3	Typy	13
2.3.4	Konstrukční metody	17
2.3.5	Styčníky	25
3	Specifika pro dispoziční návrh tribuny.....	30
3.1	Základní části, legislativa	30
3.2	Dispoziční zásady	31
3.3	Viditelnost	31
4	Zastřešení tribuny.....	33
4.1	Popis	33
4.2	Variantní řešení zastřešení tribuny	35
4.3	Statický výpočet	38
4.3.1	Zatížení	38
4.3.2	Globální numerický model	50
4.3.3	Posouzení na mezní stav únosnosti	52
4.3.4	Posouzení na mezní stav použitelnosti	134
4.3.5	Lineární a nelineární analýza	138
4.3.6	Analýza styčníku	138
4.3.7	Posouzení spojů	145
4.4	Montážní a technologický postup	154
5	Závěr.....	156
6	Seznam obrázků	158
7	Seznam tabulek	162
8	Použitá literatura	163

9	Použité grafické a výpočtové programy	164
10	Seznam příloh	164

1 Úvod

Náplní diplomové práce je statické posouzení zastřešení tribuny na městském stadionu STARS v Třinci tvořené prostorovou příhradovou konstrukcí. Nedílnou součástí posudku je výpočet zatížení a nalezení vnitřní sil. Nosná konstrukce je numericky modelována pomocí metody konečných prvků (dále jen MKP) v programu Scia Engineer 18.1. Analýza styčnicku je provedena v ANSYS 2019 R3. Teoreticky popsáno je fungování příhradových konstrukcí s důrazem na styčnický, možnosti dispozičního i konstrukčního řešení objektu, způsoby montáže. Součástí práce je výkresová část obsažená v příloze.

2 Příhradové konstrukce

2.1 Princip

Za příhradovou konstrukci se považuje struktura sestavená ze štíhlých prvků – prutů propojených ve styčnicích, které se ideálně považují za kloubové. Soustavu podepírají pouze vnější vazby ve styčnicích, které brání posunu. První příhradové konstrukce využívali už Řekové při stavbě dřevěných konstrukcí, významný posun přišel s rozvojem krytých mostů v USA v 19. století.

Předpokládá se, že zatížení na příhradových konstrukcích působí pouze ve styčnicích, a tím vznikají pouze osově (normálové) vnitřní síly, které jsou po délce prutu konstantní. Zatížení mimo styčnický se z hlediska statiky pro výpočet vnitřních sil převedou jako ekvivalentní styčnicková. Při výpočtu je řešení takové, že se zatížení nahradí dvojicí sil stejného účinku do uzlů daného prutu. Tato zjednodušení platí pouze teoreticky a skutečné konstrukci příliš neodpovídají. Stává se, že styčnický nejsou ideálně kloubové, ale spíše tuhé (u ocelových konstrukcí svařované nebo nýtované). Odborná měření ukazují, že napětí v tuhých elementech se od uvažovaných kloubových liší jen málo, proto tato zjednodušení

jsou přípustná. Větší roli v odchylce teoretické a skutečné konstrukce hraje fakt, kdy pružná deformace zatížených prutů výrazně změní tvar konstrukce a způsobí, díky tuhým vazbám, kromě očekávaných osových sil přidavné ohybové momenty. Nežádoucí ohybové momenty samozřejmě sníží efektivní využití prutů. Dále není vždy možné konstrukci zatížit pouze ve styčnicích, častým případem je zatížení spojitým zatížením, které leží přímo na prutech po jejich délce. Tužší spojení ve styčnicích má i svou výhodu. Přípustné tlakové namáhání prutu obvykle není překročeno pevností (u oceli mezi kluzu) materiálu, ale ztrátou stability prutu, která nastává po dosažení kritického napětí. Toto napětí významně ovlivňuje právě uložení prutů, přičemž tužší spojení je výhodnější. Další výhodou tužšího provedení styčníků je snazší výroba. Varianta, kdy pruty horních a dolních pásů jsou průběžné, nikoliv dělené v každém uzlu, velmi usnadní výrobu.

2.2 Uspořádání a statické působení

Příhradová konstrukce může mít rovinné nebo prostorové uspořádání. Příhrada se považuje za rovinnou, pokud všechna zatížení, střednice prutů, reakce vnitřních a vnějších sil i jedna z centrálních os setrvačnosti náleží této jedné rovině. Při návrhu konstrukce jako rovinné je proto nutné dbát na to, aby zatížení mimo danou rovinu bylo podchyceno jiným způsobem a nezpůsobilo například vybočení prutu.



Obrázek 2.1 – Rovinná příhradová konstrukce



Obrázek 2.2 – Prostorová příhradová konstrukce

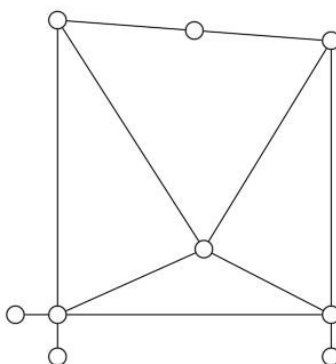
Rovinná staticky určitá soustava musí splňovat vztah 2.1. Tento vztah je pro statickou určitost nutný, není však jediný. Může nastat výjimečný případ, kdy přes splnění vztahu 2.1 konstrukce není staticky určitá. Důvodem je nevhodné uspořádání prutů a styčníků. Stav nastane, pokud prut neodebírá soustavě příslušný stupeň volnosti a zůstane jí jistá pohyblivost, vznikne tedy mechanismus. Příklad – viz obrázek 2.3.

$$p = 2s - 3, \quad (2.1)$$

kde je:

p počet prutů

s počet styčníků



Obrázek 2.3 – Výjimečný případ, kdy přes platnost vzorce 2.1 není konstrukce staticky určitá

V případě příhradové konstrukce prostorové neleží zatížení, střednice prutů a reakce sil v jedné rovině. Tento případ splňuje podmínky statické určitosti, pokud konstrukce tvoří soustavu navazujících čtyřstěnů (tzn. tři styčníky a čtyři pruty) a platí vztah 2.2.

$$p = 3s - 6 \quad (2.2)$$

2.3 Prostorové příhradové konstrukce z oceli

2.3.1 Důvod využití

Základní prvek prostorové příhradové konstrukce tvoří čtyřstěn sestavený z šesti prutů. Každý takový prvek lze rozšířit přidáním dalších tří prutů, jejichž jedny konce přísluší třem

různým uzlů základního prvku a opačné konce jsou spojeny v jeden nový styčník – viz obrázek 2.4.



Obrázek 2.4 – Zvětšení příhradové konstrukce

Výhoda oproti klasickým systémům ze sloupů a nosníků je především tuhost a lehkost, které jsou způsobeny působením konstrukce do všech tří směrů. Prvky jsou rozmístěny prostorově tak, aby v nich vznikaly primárně převládající osově síly (tlak a tah) a mohly tak být využity na své maximum. Prvky jsou rozmístěny vzájemně pravidelně, což zlepšuje náchylnost ke vzpěru jednotlivých prvků v tlaku. Plné využití všech prvků zajišťuje rovnoměrné roznášení vnitřních sil a přizpůsobení se různým zatížením. V případě velkých rozpětí, kdy převážnou část zatížení tvoří vlastní tíha, je lehkost obzvláště podstatná. Další výhodou je větší možnost prefabrikace, než u běžných ocelových konstrukcí. Díky tomu, že je velká část zhotovena již ve výrobě se zkracuje doba výstavby a snižují nároky na pracovníky přímo na staveništi, čímž se zároveň zvyšuje bezpečnost práce. Dílce jsou poměrně lehké, proto je s nimi dobrá manipulace. Kromě funkčních a konstrukčních výhod je zde obvykle i dostatečná architektonická volnost. Většina těchto staveb zaujme při prvním pohledu díky svému tvaru a přesně se opakujících prvků, které vytvářejí jakýsi vzor. Stavby působí vzdušně a prosvětleně. Plochy mezi některými pruty se mohou vyplnit pouze průhlednými výplněmi. Jednotlivé pruty příhradové soustavy bývají rovné, zakřivení vzniká ve styčnicích. Nejvýhodnějším profilem jsou obvykle trubky, které jsou výhodné pro využití v tlaku. H nebo I profily nejsou výjimkou, používají se, pokud je zde výraznější namáhání ohybem. Dalším typem profilu mohou být úhelníky.

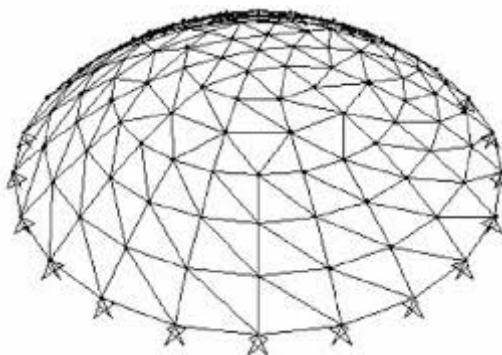
2.3.2 Historie

První člověk, který představil možnost využití prostorových příhradových konstrukcí ve stavitelství, byl Alexander Graham Bell okolo roku 1900. Jedna z prvních, některé zdroje uvádějí, že úplně první, byla použita při výstavbě Křišťálového paláce v Londýně. Další významnou osobností na tomto poli je například Polák Makowski. S potřebou překlenout stále větší rozpětí, snížení množství materiálu a nákladů, zvýšení spolehlivosti nebo architektonickým trendem se konstrukce stále vyvíjely a vyvíjejí. Významným posunem u ocelových konstrukcí byl objev plastického a elastického využití materiálu. Konstrukteři se už od dávných dob shodovali v tom, že využití prostorových příhradových konstrukcí je pro překlenutí velkých rozpětí výhodnější, než klasických nosníků. Potenciál bohužel brzdila náročnost výpočetních postupů, která se dala zvládnout až s příchodem počítačů. To umožnilo architektům pouštět se do odvážnějších konstrukcí. Další výhodou je velká prostorová tuhost a rychlá výstavba.

2.3.3 Typy

Příhradová kupole

Kupole obecně je jednou z nejstarších struktur v architektuře. Obvykle se jedná o rotační plochy. Vznikají především membránová tlaková napětí s výjimkou tahových napětí v blízkosti hran a velmi malých ohybových momentů v místě křížení diagonál s obvodovým kruhovým nosníkem. V praxi se používají následující typy: Schwedlerova, geodetická, lamelová, třicestná mřížová. Příhradová kupole zastřešuje například skleník v Parku královny Alžběty ve Vancouveru, Kanada.

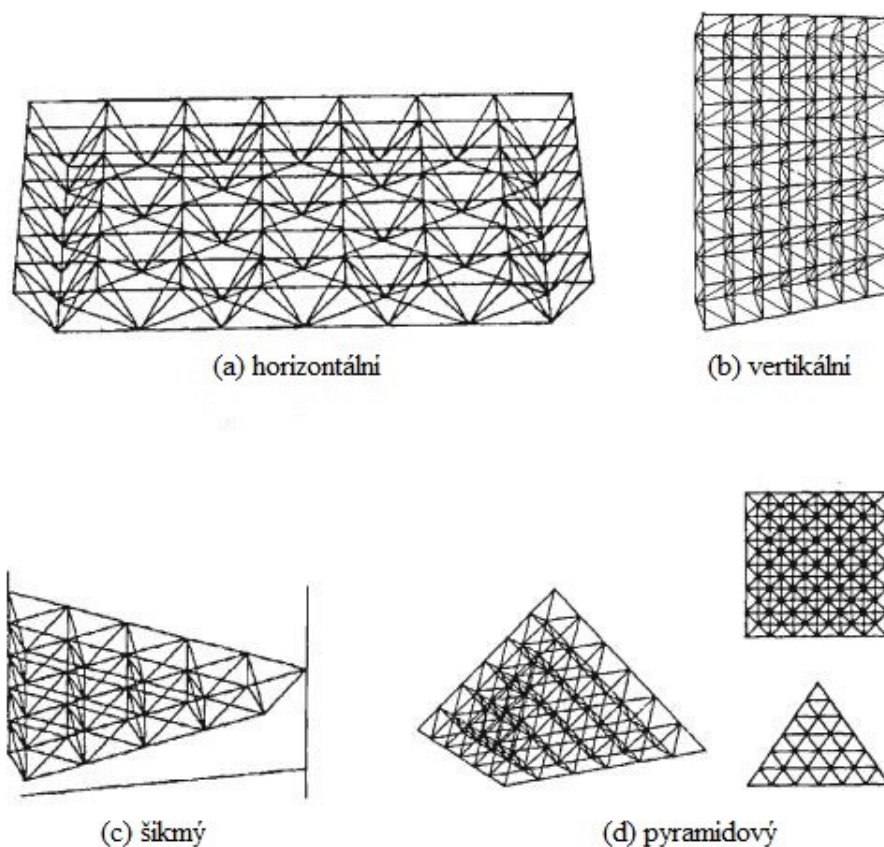


Obrázek 2.5 – Schématická ukázka kupole

Rovinný rošt

Nejjednodušším případem je dvouvrstvý rovinný rošt. Jeho výhodou je velká tuhost, snadná montáž a výroba. Skládá se ze dvou vrstev plošných rovnoběžných roštů vzájemně se překrývajících nebo posunutých obvykle o 45° . Rošty mohou mít stejnou nebo rozdílnou geometrii skládající se ze čtverců, obdélníků či šestiúhelníků. Pro větší tuhost a únosnost mohou být rošty i několikavrstvé. Rozsah použití všech různých typů je obrovský.

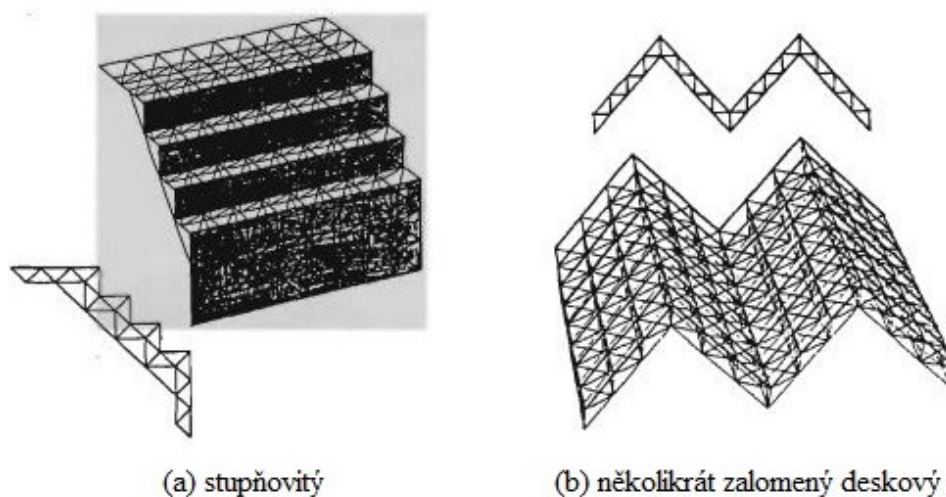
I při velkém zatížení systému jsou jednotlivé pruty namáhány pouze osovými silami a jejich využití je tak maximální. Ve třívrstvěm rovinném rámu, jehož střední vrstva působí jako neutrální střední mezivrstva, může systém dosahovat rozpětí přes 100 m a to i přes omezený počet podpor. Příkladem může být sportovní hala STARS v Třinci.



Obrázek 2.6 – Příklady různého uspořádání a tvaru roštů

Skládané desky

Jsou tvořeny několika rovinnými deskami (jedno či vícevrstvými), které mění svůj tvar ve vrcholech. Mohou být vyrobeny spojením několika předem vyrobených desek nebo častější variantou je, že se vyrobí požadovaný tvar rovnou. Systém je schopen dosáhnout velkého rozpětí, přičemž každá loď může mít jiné architektonické či třeba akustické požadavky. Díky vhodnému tvaru některých zalomení se tvary konstrukce mohou přibližovat zakřiveným konstrukcím, což je ze statického hlediska výhodné. Zejména pak dvojvrstvé uspořádání zlepšuje tuhost a rozložení vnitřních sil. Výhodou těchto systémů je, že při správném návrhu jejich únosnost a tuhost závisí spíše na geometrickém tvaru, než na vlastnostech materiálu. Konstrukcí ze zalomených desek je například zastřešeno mezinárodní letiště Baltimore ve Washingtonu, USA.

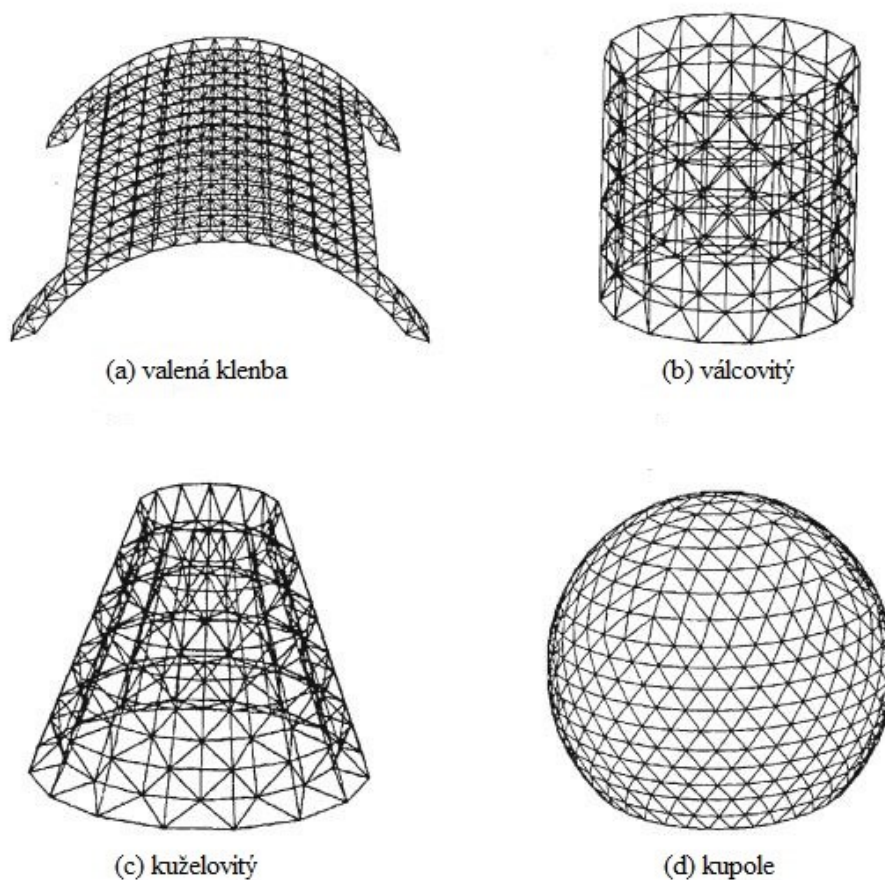


Obrázek 2.7 – Nejčastěji používané typy skládaných deskových konstrukcí

Zakřivené konstrukce

Geometrický tvar vzniká pohybem křivky (tzv. generátoru) ležící v dané rovině, křivky ležící v jiné rovině nebo rotací generátoru okolo přímky. Tvar konstrukce je ve většině případů volen dle Gaussových křivek. Pokud obě hlavní křivky mají stejnou konvenci, jako je kulový vrchlík (koule, kupole, eliptický paraboloid), pak jsou obě křivky kladné. Pokud je tvar konstrukce zakřiven pouze v jednom směru, jako například v případě valené klenby či kužele, Gaussovo zakřivení je nula. Jestliže znaménka křivek jsou opačná, stejně jako

u hyperbolického paraboloidu a hyperboloidu, Gaussova křivka je záporná. Přestože klenby a kupole jsou nejrozšířenějšími tvary, používají se i jiné, mnohdy matematicky těžko popsitelné, tvary. Dvousměrné namáhání převažuje v případech s nulovou Gaussovou křivostí, kde se krom normálové síly nachází i ohybová, která může vzniknout při nesymetrickém zatížení. U konstrukcí s nenulovou Gaussovou křivostí vznikají na povrchu primárně normálové síly, ale také posouvající a smykové. Pokud je konstrukce mělká, vliv ohybových momentů zaznamená konstrukce jen lokálně v blízkosti okrajů. Moderní konstrukce, obvykle jednovrstvé, jsou tvořeny hustým, modulárním, všesměrným roštem vytvořeným podle pohybu křivky. Pruty, nejčastěji trubky, mívají stejnou nebo jen mírně odlišnou dimenzi. Tyto konstrukce nejčastěji tvoří trojúhelníkové, ale také čtyřúhelníkové a šestiúhelníkové prvky. Ačkoli jednovrstvé systémy jsou nejpoužívanější, pro překlenutí větších rozpětí je někdy vhodné zvolit dvouvrstvý. Vložením diagonály mezi horní a dolní vrstvu se dosáhne větší tuhosti a únosnosti konstrukce. Toto také vylepší vlastnosti konstrukce z hlediska stability a dynamických účinků. Architektonicky zajímavým příkladem je Centrum Hejdara Alijeva v Baku, Azerbajdžán.



Obrázek 2.8 – Příklady tvarů zakřivených konstrukcí

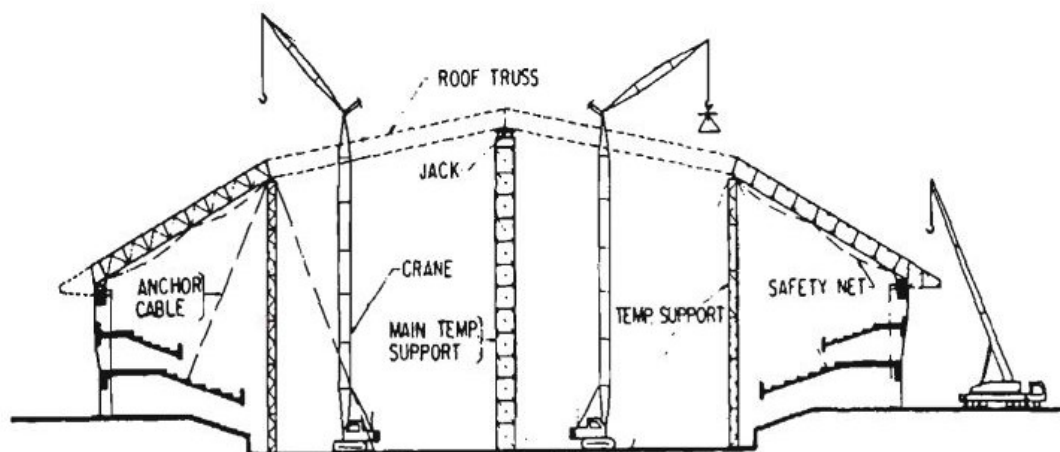
2.3.4 Konstrukční metody

Konvekční metoda

Prostorové příhradové konstrukce vyžadují přesnou výrobu všech komponentů. Přesnou polohu styčníků je třeba znát už při výrobě. I malá nepřesnost při výrobě může způsobit velkou chybu při montáži na stavbě, kde se chyba může naakumulovat. Je těžké předvídat, jak imperfekce i jen jednoho prvku ovlivní postup další výstavby. Téměř nemožné je předem rozpoznat, která nepřesnost může výstavbu ovlivnit a která ne. Většina konstrukcí je vytvořena buď přímo na místě spojením jednotlivých prutů, nebo složením prvků na zemi a následným vyzvednutím větších celků do finální polohy. V některých případech, pokud to okolnosti umožní, je možné na zemi složit a následně vyzvednout celou konstrukci. Metodu lze klasifikovat do čtyř různých postupů – výstavba pomocí lešení, zvedání bloků, zvedání celé konstrukce, pneumatická výstavba.

Výstavba pomocí lešení

Nejčastěji využívaný způsob. Jednotlivé prvky jsou manuálně montovány do konstrukce přímo na místě pomocí dočasného podpůrného lešení. Během výstavby je částečné nebo úplné podepírání lešením nezbytné. Při montáži je možné, na dostatečně velké ploše, že několik pracovníků kompletuje několik prvků najednou, kdy na konstrukci může probíhat svařování, montování a další práce současně. Postupuje se od níže položených prvků směrem nahoru. Každý prvek je ke konstrukci připevněn okamžitě. Poloha se průběžně kontroluje, aby nevznikaly nežádoucí nepřesnosti a konstrukci bylo možné vůbec postavit. V tuto chvíli se lešení stává velmi důležitou součástí stavby, která zásadně ovlivňuje geometrii, a tím možnost konstrukci vůbec sestavit.

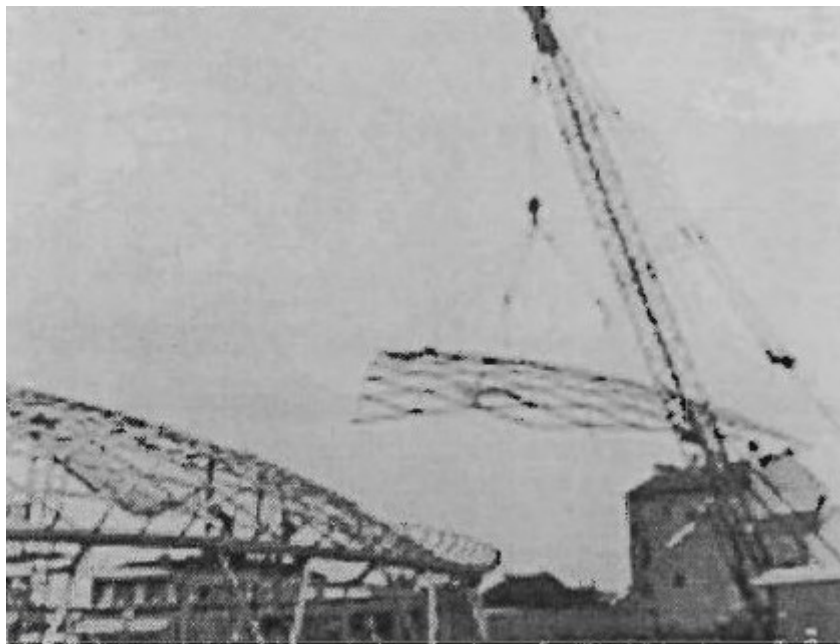


Obrázek 2.9 – Ukázka montáže pomocí lešení

Výhodou je to, že není potřeba žádná těžká technika pro montáž na zemi a i velká rozpětí je možné překlenout za použití relativně lehké techniky. Bohužel, metoda není vždy příliš efektivní a ekonomická, lešení tvoří podstatnou část v rozpočtu. Velká konstrukce vyžaduje velké lešení a tím rostou náklady. Sestavení konstrukce ve výšce je náročnější, zabere více času a vyžaduje vyšší nároky na pracovníky a bezpečnost. I přes všechny nevýhody je někdy nutné k této variantě přistoupit a to zejména v případě omezených prostorových možností na staveništi.

Zvedání bloků

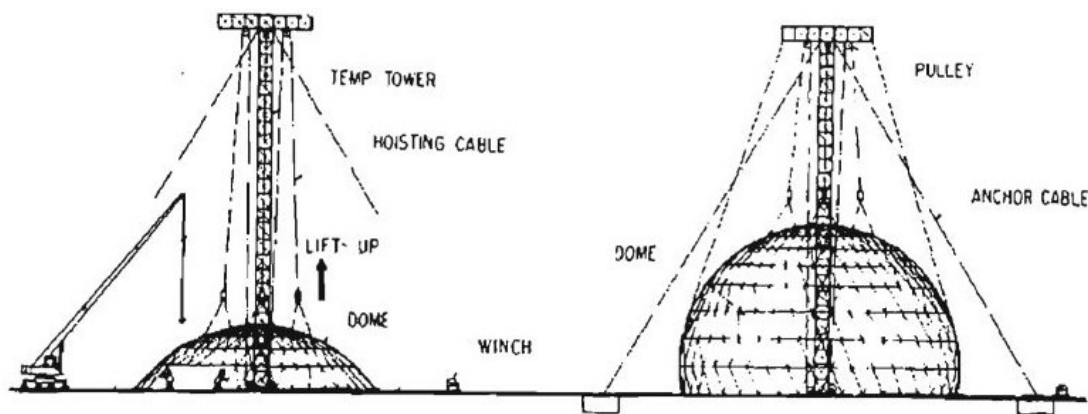
Z důvodu malé efektivity a velkých nároků na bezpečnost metody s pomocí lešení vznikla metoda na zvedání celých bloků. Na zemi je vytvořena část konstrukce, která je následně zvednuta do konečné polohy. Menší bloky jsou zvedány speciálními jeřáby. Pokud je potřeba, dočasné ležení je sestaveno pro spojení bloků. Bloky jsou následně spojovány do finální podoby konstrukce. Oproti předchozí metodě je práce ve výšce o mnoho méně. Je však nutné mít k dispozici dostatečně prostorné staveniště a jeřáb, který dokáže vyzvednout bloky do požadované polohy. Metoda se obvykle používá u větších a technologicky náročnějších konstrukcí.



Obrázek 2.10 – Zvedání bloku při montáži

Zvedání celé konstrukce

Metoda spočívá v tom, že je celá konstrukce, nebo její převážná část, sestavena na zemi a následně vyzdvihnuta do finální polohy. Technologie se používá pro výstavbu vysokých konstrukcí, kde by zvedání pouze jednotlivých prvků nebo bloků bylo příliš nákladné. Vodorovná poloha sestavy zůstává během zvedání stále stejná. Kromě jeřábu je ke vztyčení nezbytný hydraulický zvedák a naviják. Často se pro zvedání využívá nosné funkce sloupů, díky kterým se sníží nároky na zvedací zařízení. Metoda je nejčastěji využívána při výstavbě dvouvrstvých roštových systémů. Pro zvedání jiných typů, např. zakřivených konstrukcí nebo kupolí, se metoda stává o mnoho náročnější a není tak často používána. Tímto typem výstavby se zvyšuje efektivita, navíc, díky pohodlnější montáži, mají pracovníci větší kontrolu nad prováděnou prací.



Obrázek 2.11 – Zvedání kupole, které je technicky poměrně náročné

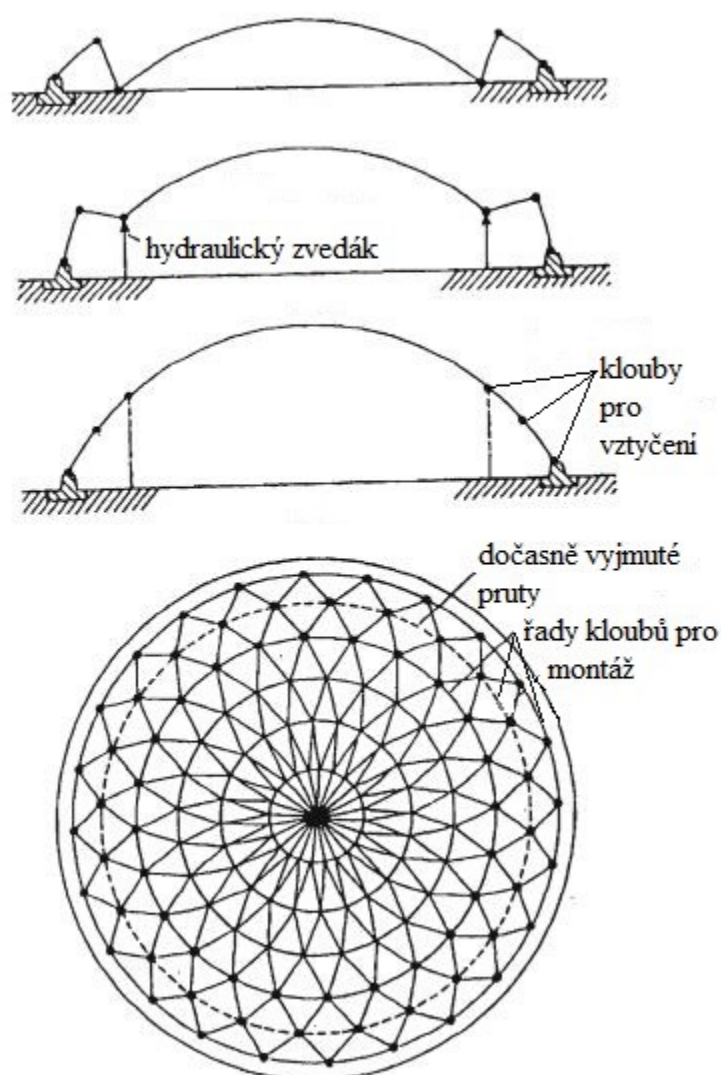
Pneumatická výstavba

Metoda vyvinuta pro tzv. Binistar systém. Konstrukce bývají demontovatelné. Jsou pneumatically vyzvednuté a tvarované od země směrem nahoru až po konečnou zamykací polohu tvořenou pomocí nafukovací vzduchotěsné membránové textilie. Textilie je napnuta a připevněna k vrcholové části konstrukce. Tu tvoří teleskopické tyče s variabilní délkou a jsou ukotveny po natlakování do požadované hodnoty. Konstrukci tvoří trojúhelníkové prvky. Existují i další podobné metody pro zvedání těchto konstrukcí.

Metoda postupného zvedání

Jedná se o ekonomický způsob pro výstavbu kupolí. Možno říci, že je to jeden z přístupů výstavby zvedaných konstrukcí. Princip spočívá v tom, že se geometricky nestabilní kupole sestavuje postupně během vztyčování. To se provádí dočasným vyjmutím členů, které leží na obruči kruhu. Kupole se pak stává mechanismem a umožňuje kontrolu nad pohybem. Mechanismus je podobný pantografu využívaného u elektrických vlaků, z čehož pochází anglický název systému „pantadome“. Konstrukce jsou montovány z předem složených tvarů nízko nad zemí. Vzhledem k tomu, že je celková výška kupole při montáži nízká, v porovnání s následným zvedáním, montážní práce jsou prováděny v poměrně příjemném a bezpečném prostředí. Díky tomu je i kvalita prováděné práce vysoká. Tímto způsobem se neprovádí pouze montáž nosné konstrukce, ale i dalších prací jako například úpravy vnitřních a vnějších povrchů, instalace, izolace. Následně je konstrukce vyzvednuta. Zvedání může být dosaženo

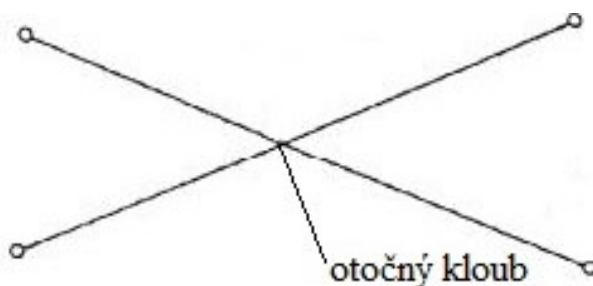
foukáním vzduchu dovnitř kupole, díky němuž se zvýší vnitřní tlak, který tlačí s pomocí hydraulického zvedáků horní část směrem nahoru. Po dosažení konečného tvaru jsou prvky na obruči, které byly během zvedání dočasně vyjmuty, připevněny do finální polohy. Následně už zvedáky a vháněný vzduch nejsou potřeba, konstrukce může být dokončena. Protože při zvedání je zabezpečen pouze svislý směr, je nezbytné během výstavby použít prvky zabraňující překlopení konstrukce. Pohyb a deformace celého tvaru během výstavby jsou prostorové a mohou působit komplikovaně, jejich kontrola je ale snadná. V systému jsou tři druhy kloubů potřebné pro zvedání, které se během vztyčování mohou pohybovat. Pohyb všech je všesměrný. Příkladem může být palác svatého Jiří v Barceloně.



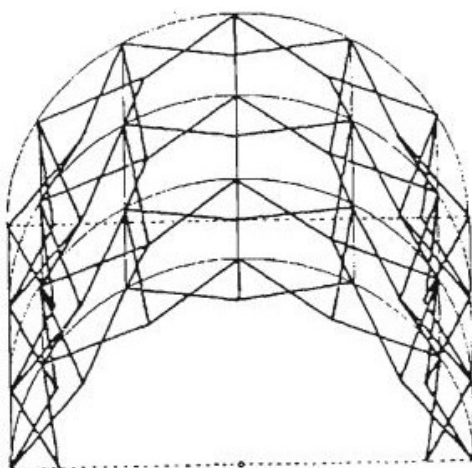
Obrázek 2.12 – Proces vztyčování metodou postupného zvedání

Přemístitelné konstrukce

Přemístitelné konstrukce je rozsáhlý pojem zahrnující širokou škálu konstrukcí, které se ve složené formě přepraví na místo a po následném rozložení plní svou funkci. Lze říct, že téměř všechny tyto konstrukce jsou prefabrikované prostorové příhrady sestavné z přímých prutů spojených už ve výrobě. Následně jsou složeny do pohodlně přemístitelného celku, který lze snadno rozložit a překlenout tak velká rozpětí. Po rozložení a uzamčení se konstrukce stává stabilní a je schopna přenášet zatížení. Jejich opětovné použití a přemístění umožňuje snadnou a rychlou montáž a demontáž. Konstrukce se využívají pro armádní účely, letecký průmysl a další dočasné stavby. Základnímu prvku se říká nůžkový – viz obrázek 2.13. Skládá se ze dvou rovných přímých prutů spojených v mezilehlém otočném kloubu, který umožňuje otáčení tyčí kolem osy kolmé k jejich rovině. Základní mechanismus rozložitelných konstrukcí je založen na předpokladu existence právě těchto nůžek. Celá konstrukce je těmito prvky vyskládaná, některé mohou být tažené, jiné tlačené. Tvar konstrukce lze měnit přidáním nebo odebráním prvků. Ve složené konstrukci jsou všechny vzpěry rovnoběžné a složeny do úzkého celku, při rozložení se z nich stávají rovinné nebo zakřivené polygony. Metodu lze rozdělit na tři druhy – manuálně zamykatelné, samozamykací a adaptivní.



Obrázek 2.13 – Základní prvek nůžkového systému



Obrázek 2.14 – Rozložitelná valená klenba

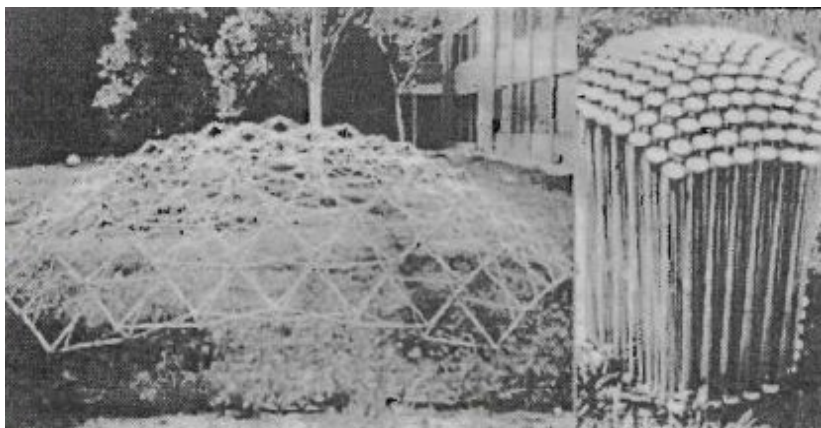
Manuálně zamykatelné

Výhodou manuálně zamykatelných konstrukcí je, že se během montáže a demontáže nepřenáší napětí. Dočasné podpory a ruční zamknutí jsou nutné.

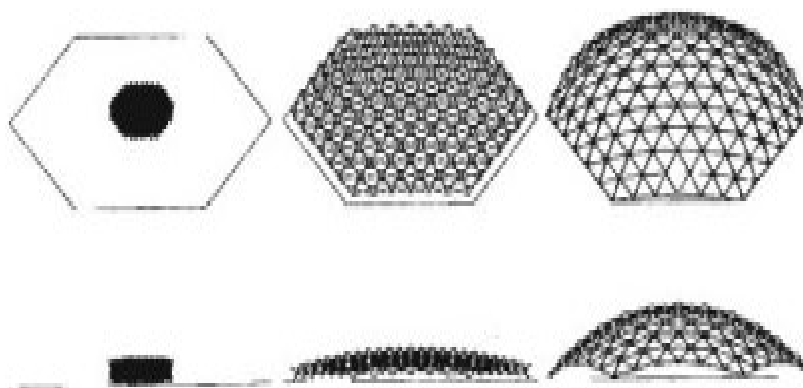
Samozamykací

V porovnání s manuálně zamykatelnými systémy je hlavní výhodou samozamykacích, že po provedení montáže není potřeba žádných vnějších stabilizátorů. Naopak nevýhodou je, že v prutech mohou během montáže vznikat napětí. U některých typů mohou zbytková napětí přetrvávat i po ukončení montáže. Za určitých podmínek se dá i tomuto efektu vyvarovat. Pro dosažení stavu, aby nevznikala reziduální napětí v prutech, byl v roce 1993 vyvinut nový systém těchto konstrukcí. Konstrukce tvořena polygonálními celky, kde každá část funguje jako nůžkový systém.

Jedním z typů samozamykacích přemístitelných konstrukcí jsou ploché rošty a kupole vyvinuté konstruktérem Zeiglerem. Geometrické vlastnosti jsou založeny na základě vlastností nůžkového systému. V dalším rozvoji těchto konstrukcí pokračoval konstruktér Clarke.



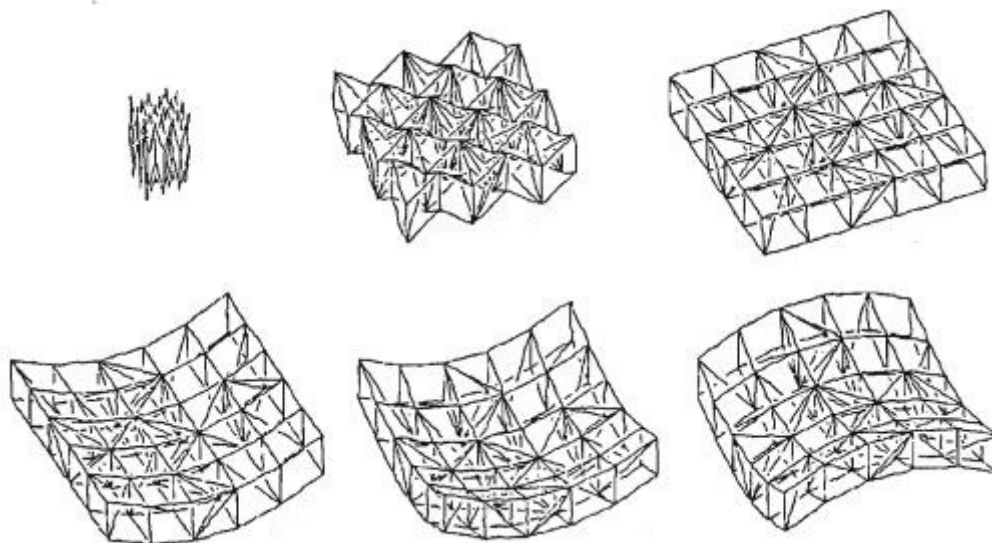
Obrázek 2.15 – Kupole před a po rozložení



Obrázek 2.16 – Proces rozkládání kupole

Adaptivní

Jedná se o systém, kde geometrický tvar a vlastní struktura je charakteristická tím, že se umí vhodně přizpůsobit. Jsou zde využívány vyměnitelné části. Uspořádání jsou řízena teleskopickými pohony bočních prvků. Teleskopické prvky obsahující pohony a senzory, které reagují na vnější podněty, jako jsou elektrická, tepelná nebo magnetická pole. Příklad – viz obrázek 2.17. Těchto systémů se někdy využívá například i pro konstrukce velkých osvětlení.



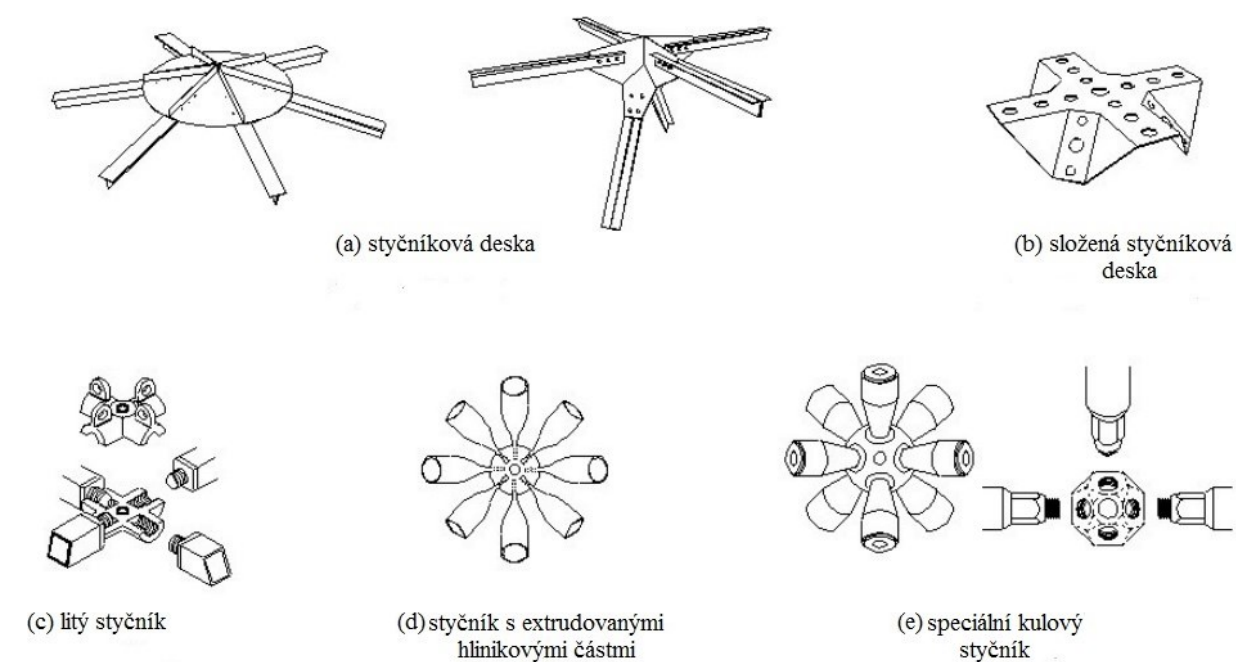
Obrázek 2.17 – Příklady adaptivních konstrukcí, které se obvykle přizpůsobí Gaussovým křivkám

2.3.5 Styčníky

Jedním z nejdůležitějších prvků prostorové (i rovinné) příhradové konstrukce, ať už funkčním, estetickým či ekonomickým, jsou styčníky. Tyto detaily v příhradové konstrukci jsou o mnoho sofistikovanější, než u jiných typů konstrukcí. Jednotlivé prvky směřují do všech stran, přenášení sil je mnohem komplikovanější. Pro efektivitu styčníků jsou důležité nejen spojovací prvky samotné, ale také přesná délka, úhel a přesné opracování zakončení prutu jdoucího do styčníku. Ideální styčník neexistuje, následující parametry napomáhají volbě správného. Rozhodující pro návrh je počet prutů v uzlu, tvar a dimenze průřezů, možnost ukončení prutů ve styčníku, snadná výroba a montáž, rozpočet. Pravidelnost geometrie styčníku určuje geometrii celé příhradové konstrukce. U převážné většiny styčníků je snaha dosáhnout centrického spojení. Excentrické styčníky mohou znamenat přídavné ohybové momenty, které vedou k návrhu větších profilů. U některých konstrukcí je z výrobních a montážních důvodů jednodušší některé pruty nechat jako průběžné a jiné k nim připojit i za cenu malé excentricity. Například pro uzly se styčníkovou deskou jsou obvyklá připojení prutů šroubovým přípojem, může se však použít i připojení svařem. Další typ přípoje může být pomocí závitů přímo na prutu. Obvykle se jako ideální uvádí jeden styčník na cca tři čtvereční metry příhradové konstrukce. Opakování uzlů a prutů umožňuje

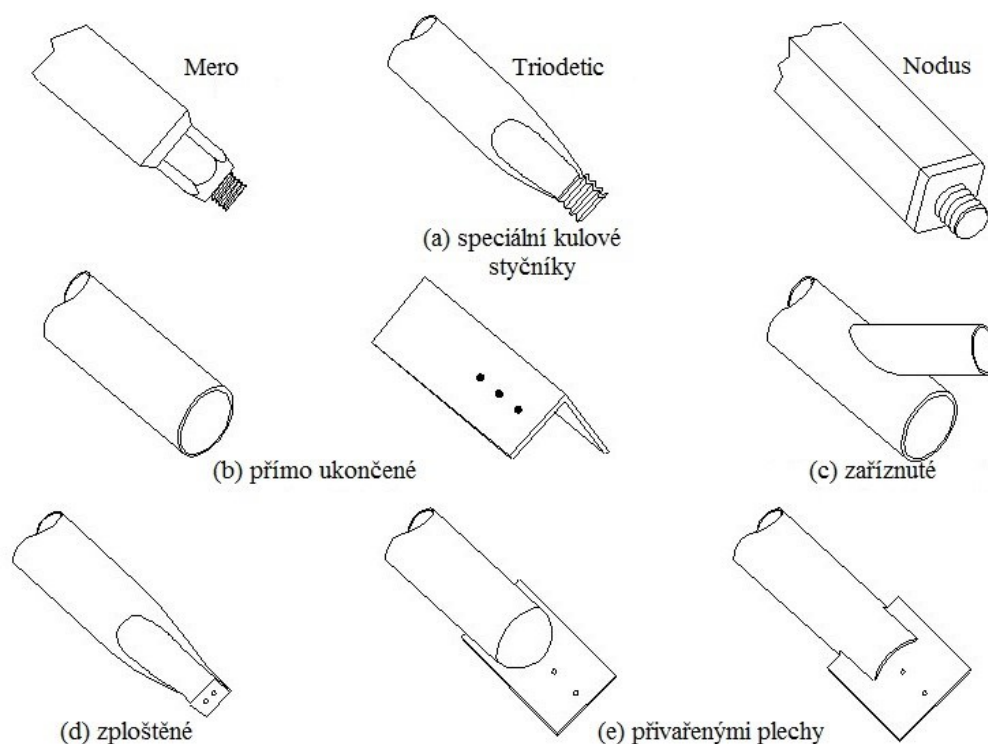
použití standardních součástí a snižuje náklady spojené s výrobou a montáží. Ideálním materiálem pro styčníky je měkká, poddajná ocel.

Příklady možných styčníků



Obrázek 2.18 – Příklady základních používaných styčníků

Příklady ukončení prutů připojovaných ke styčnickům



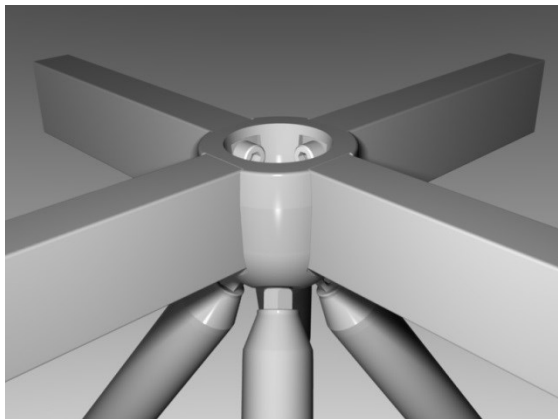
Obrázek 2.19 – Příklady možných ukončení profilů připojovaných ke styčnickům

Mero

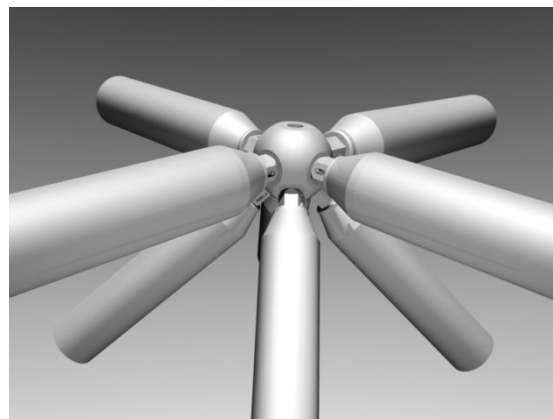
Vývojem tohoto styčníku se německá firma začala zabývat už před 2. světovou válkou. Dnes má styčník této firmy mnoho podob. Nejčastější využití nachází u jednovrstvých nebo dvouvrstvých roštů. Prvky jsou pozinkované a vyráběny v různých velikostech podle velikosti zatížení. Výhodou systému v porovnání s jinými styčníky je velká přesnost, která je bohužel kompenzována vysokou cenou. Tento systém byl použitý například při výstavbě multifunkční arény Ericsson Globe ve Stockholmu, Švédsko.

Například typ KK-Ball – viz obrázek 2.20 je dutá polokoule, ke které může být připojeno až 18 prutů opatřených závity. Prvky jsou lehké, snadno se s nimi manipuluje, není potřeba svařování. Je vhodný pro dvouvrstvé i vícevrstvé struktury s rozpětím až 100 m.

Ukázka typu NK-Bowl je zobrazena na obrázku 2.21. Styčník je vhodný pro dvouvrstvé systémy. Výhodou je, že styčník lícuje s pruty, opláštění může být tedy kladeno přímo na nosnou konstrukci. Pro připevnění se používají předpjaté šrouby.



Obrázek 2.20 – Typ KK-Ball



Obrázek 2.21 – Typ NK-Bowl

Triodetic

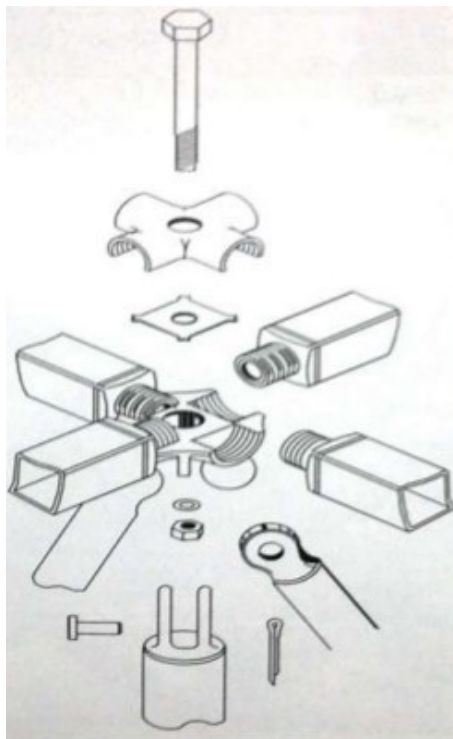
Styčník pochází z Kanady z počátku 60. let 20. století. Skládá se ze středového náboje, jehož součástí jsou drážky pro připojení jednotlivých, na konci zploštělých, prutů. Pro koncovou úpravu prutů se používá speciální lis. Kloub je zajištěn svěrným šroubem s maticí a podložkami. Pro vylehčení bývá styčník z hliníku. K jednomu styčníku je možné připojit až 12 prutů v téměř libovolném úhlu. Na trhu je šest různých typů tohoto styčníku. Je vhodný pro stavbu kupolí, roštů i volně zakřivených povrchů. Umí přenášet tahové, tlakové namáhání i jejich kombinaci. Pomocí systému je možné překlenout až cca 135 m. Systému bylo využito například při stavbě paláce Cinesphere v Torontu, Kanada.



Obrázek 2.22 – Styčnick Triodetic

Nodus

Pochází z přelomu 60. a 70. let 20. století z Anglie. Nejčastější využití nachází u roštových a deskových konstrukcí. Připojovaný dutý prut může být pravoúhlého nebo kruhového tvaru (pro každý z tvarů je modifikováno šest typů různých dimenzí). Styčnick tvoří dvě půlkulovitá pouzdra a vysokopevnostní šroub. Po dotažení šroubu jsou pruty, s přivařeným závitem na konci, pevně upnuty mezi obě poloviny pouzdra. Hlava šroubu je zapuštěna, aby bylo možné klást opláštění přímo na nosnou konstrukci. Mezi pouzdra se vkládá těsnicí podložka. Dalšími komponenty jsou podložky, matice, šrouby, vidlicový konektor či kolík. Systém je nastaven tak, aby nebylo možné styčnick zkompletovat chybně. Předpokládá se, že není slabým místem konstrukce.



Obrázek 2.23 – Styčnick Nodus

3. Specifika pro dispoziční návrh tribuny

3.1 Základní části, legislativa

Tribuny jsou tvořeny sedačkami, uličkami pro vertikální průchod mezi jednotlivými řadami, vstupy pro diváky a dalšími prostory nezbytnými pro fungování tribuny profesionálního stadionu jako jsou místa pro osoby se sníženou schopností pohybu, prostory pro novináře, kamery, zázemí pro trenéry apod. Všechny tyto části mají dané své minimální a maximální počty a rozměry dané legislativou, ta je samozřejmě odlišná dle norem pro jednotlivé státy. U významných stadionů ji také mohou regulovat mezinárodní federace jako např. FIFA. Je potřeba dbát zvýšené pozornosti na bezpečnost, především pak na požární odolnost. U těchto staveb nabírá na důležitosti nejen zatížení statické, ale i dynamické účinky.

3.2 Dispoziční zásady

Nosná konstrukce je obvykle z prefabrikovaných železobetonových dílců. Ty jsou podepírány šikmými nebo vertikálními sloupy. Jejich rozpon se odvíjí od počtu sedaček v řadě, základových poměrů. Odlišné podmínky bývají u první a poslední řady a u vstupů na tribunu. Často nastává situace, kdy je první řada sedaček vykonzolovaná. V tom případě je z pohledu dynamiky výhodné vytvořit prefabrikovaný dílec jako jeden celek spojený se zábradlím. Ten se následně kotví k šikmému nosníku bez toho, aniž by snižoval podchodnou výšku pod nimi. U vstupů na tribunu mohou nastat situace, že je přístup z vrchu nebo ze spod nebo kombinace obou.

Pro řady mezi uličkami je limitní počet 48 sedadel u pozvolného sklonu, 36 u příkrého. Hloubka řady je minimálně 700 mm, ideálně 800 mm. Boční vzdálenost sedadel nesmí být menší než 450 mm, optimálně však 500 mm. Minimální hloubka sedadla je 350 mm, doporučená 400 mm. Nejmenší výška opěradla nemá být menší než 300 mm, doporučuje se 350 mm. Rozdíl mezi úrovní sedadla a dolní uličky je maximálně 450 mm, optimálně 400 mm. Východ od každého diváka na venkovní tribuně nemá být dále než 60 m a musí ho být schopen dosáhnout maximálně do osmi minut. U vnitřní tribuny je limit 30 m a dvě minuty. Proto musí být východ řádně označen. Uvažuje se např., že východem šířky 1,2 m je schopno projít 79 diváků za minutu. V případě, že by byl východ na úrovni hrací plochy, počet diváků se zvyšuje na 100 za minutu. Velké tribuny bývají odděleny ploty po cca 2500 místech. Místa pro stání, na rozdíl těch od sezení, nejsou dány rozměry sedaček a přidružených prvků, ale plochou. Na 10 m² může na rovné ploše stát až 35 diváků, na stupních 47.

3.3 Viditelnost

Je jeden z rozhodujících faktorů návrhu. Charakterizována je tzv. koeficientem *C-value*, který popisuje viditelnost nad osobou sedící v řadě před sledovaným divákem. Podle něj se například odvíjí i ceny vstupenek. Koeficient viditelnosti lze vyjádřit následovně:

$$C\text{-value} = (RhD - AB)/(D + B), \quad (3.1)$$

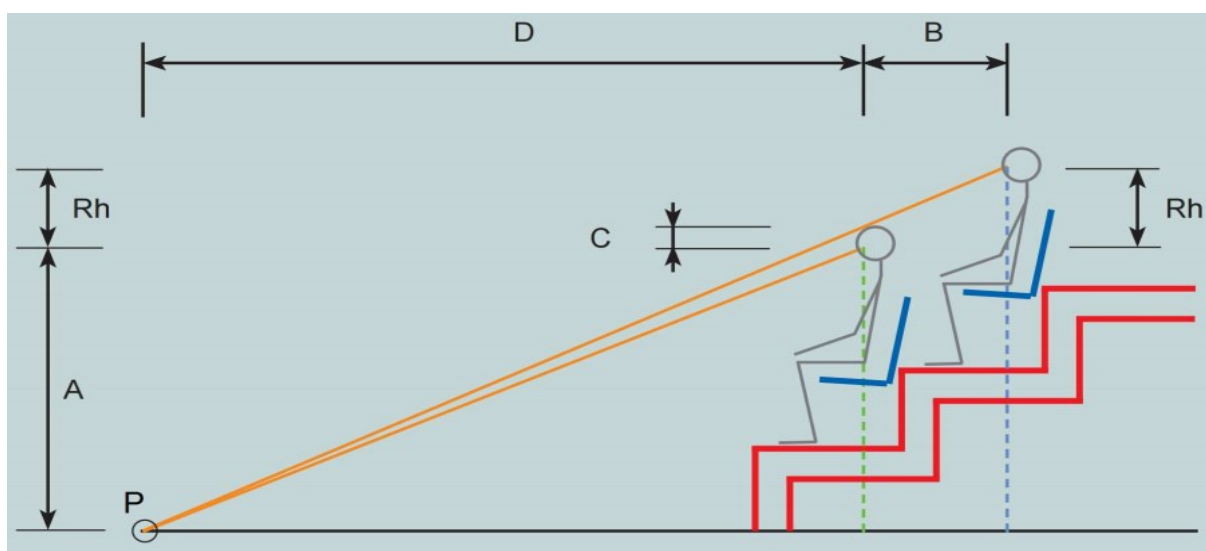
kde je:

Rhvýška řady

Avýška oka sedícího diváka nad vztažným bodem

Bšířka řady

Dpůdorysná vzdálenost od vztažného bodu



Obrázek 3.1 – Schéma vysvětlující vzorec pro výpočet $C\text{-value}$ (C)

Výsledné hodnoty $C\text{-value}$ se hodnotí následovně:

150 mm (vynikající)

120 mm (velmi dobré)

90 mm (vyhovující, obvykle se tato hodnota uvažuje jako minimální)

60 mm (naprosté přípustné minimum).

Pro projektování konstrukce se používají tzv. křivky viditelnosti. Pro návrh je důležité určit si tzv. vztažný bod, ke kterému se následně posuzuje sklon (nesmí překročit 35° pro sezení, 10° pro stání). Jedná se o situaci, kdy jsou hráči nejbližší k tribuně, např. u hokeje se jedná o horní hranu mantinelu. Dalším parametrem pro návrh je vzdálenost první řady od vztažného bodu a výška první řady od hrací plochy. Snad ještě důležitější, než výše jmenované geometrické závislosti je zkušenost architekta odhadnout fyziologii lidského oka. Dle navrženého konceptu je pak nutno kontrolovat nejextrémnější úhly a vzdálenosti diváka

versus místa na hrací ploše. Komfortní zóna je 30 až 60°, kterou ale obvykle nelze dodržet pro všechny diváky. Doporučené vzdálenosti se pochopitelně liší pro jednotlivé sporty. Např. u fotbalu platí 90 m od středu hřiště a 190 m od protilehlého rohového praporku.

4 Zastřešení tribuny

4.1 Popis

Hlavním cílem této práce je posouzení zastřešení tribuny. Posuzovaná konstrukce byla uvažována jako stávající stavba nacházející se na městském stadionu STARS v Třinci. Informace a technické údaje byly zjištěny především z naměřených hodnot. Údaje, které nebylo možno získat, byly vhodně navrženy. Z tohoto důvodu se pravděpodobně konstrukce zcela neztotožňuje s uvažovanou reálnou stavbou, ale snaží se jí co možná nejvíce přiblížit.

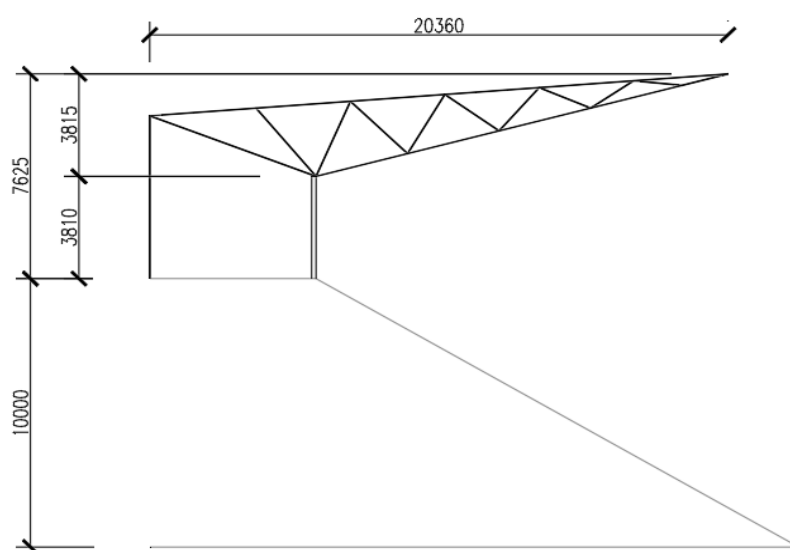
Hrací plocha stadionu slouží jako fotbalové hřiště, okolo kterého se nacházejí atletické dráhy. Horní ovál, procházející pod částí zastřešení tribuny, má zpevněnou asfaltovou plochu a slouží především inline bruslařům. Zastřešená část tribuny pojme cca 2500 míst k sezení, jsou zde prostory pro osoby na invalidním vozíku, zázemí pro personál či novináře. Zastřešení je osazeno na železobetonové konstrukci, táhla jsou kotvena do prostého betonu v zemi.

Zastřešení tribuny je řešeno ocelovou prostorovou příhradovou konstrukcí. Konkrétně 20 dílců tří typů. Přímoou část tvoří 14 dílců, zakřivení na okrajích vždy tři a tři. Jednotlivé typy dílců se liší z důvodu vytvoření půdorysného zakřivení. To je způsobeno natočením horního pásu a zkrácením diagonál a stropnic. Dále je posuzován pouze jeden typ dílce s uvážením na stranu bezpečnou a to D_1 – viz příloha č. 1. Tento dílec má nejdelší vzpěrné délky prutů, které jsou pro namáhání rozhodující. Všechny dílce jsou na dvou místech bodově kloubově podepřeny a na dvou místech zajištěny dvojicí táhel kotvených do země. Dílce (včetně jejich částí) jsou montážně spojeny v jeden celek. Kloubové podpory jsou osazeny na železobetonových prvcích, které vytvářejí šikmé sloupy propojené v hlavě dalším vodorovným železobetonovým prvkem. Celková délka zastřešení po rozvinutí je cca 134 m. Šířka zastřešení včetně vystouplých částí je cca 20,36 m. Výška zastřešení je 7,625 m nad terénem na straně odvrácené od hrací plochy a cca 17,625 m na opačné straně.

Šířka dílce ve směru délky tribuny je 6,712 m. Krytinu tvoří trapézový plech uložený na stropnicích U profilu. Ze stropnic se zatížení přenáší do horního pásu příhrady, které má každý dílec tři. Ten je tvořen dvěma U profily svařenými do tvaru I uprostřed dílce a vždy jedním U profilem na kraji. Následně je zatížení přenášeno diagonálami až do spodního pásu příhrady. Oba typy prutů jsou z kruhových trubek různých dimenzí. Odstupňování od většího profilu k menšímu je provedeno směrem k volnému konci. Táhla jsou také kruhové trubky. Účinky zatížení ze spodních pásů jsou přenášeny přes podpory až do základů. Táhla jsou samostatně ukotvena a založena. Styčníky jsou řešeny specificky pomocí duté koule, nebo její části, ke které jsou pruty navařeny.



Obrázek 4.1 – Konstrukce zastřešení městského stadionu STARS v Třinci

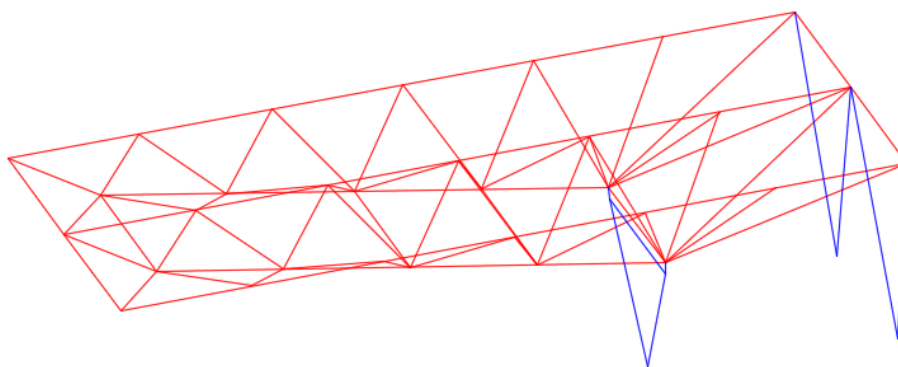


Obrázek 4.2 – Schéma zastřešení a jeho orientace vůči sedadlovému prostoru a okolnímu terénu

4.2 Variantní řešení zastřešení tribuny

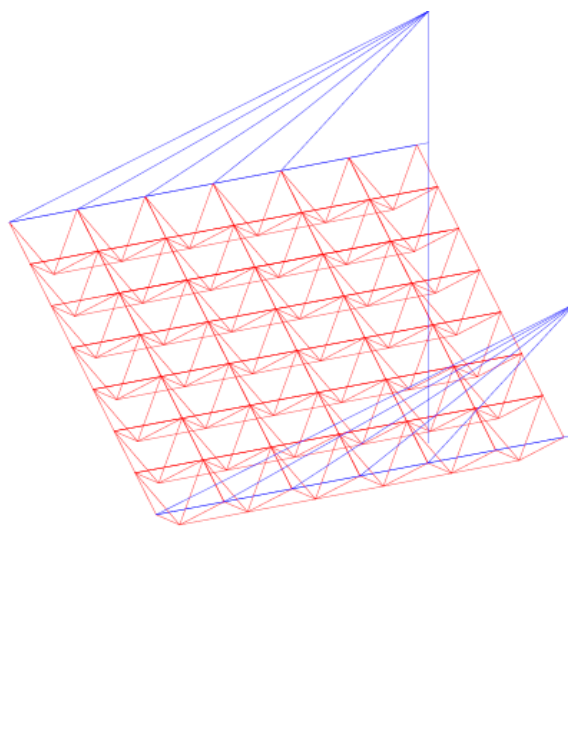
Možností, jak zastřešit tribunu pomocí nosné konstrukce tvořené prostorovou příhradou je nespočetně mnoho. Systém obvykle spočívá v tom, že plošný příhradový rošt je bodově či liniově podepřen v krajní části dílce a v překlopení volného konce brání táhla. Jiným řešením může být možnost, kdy příhradová konstrukce netvoří desku, ale pouze nosný rám, který je nutno překlenout dalšími, příčně uloženými, pruty. I v tomto případě se obvykle nelze vyhnout použití táhel.

Varianta A



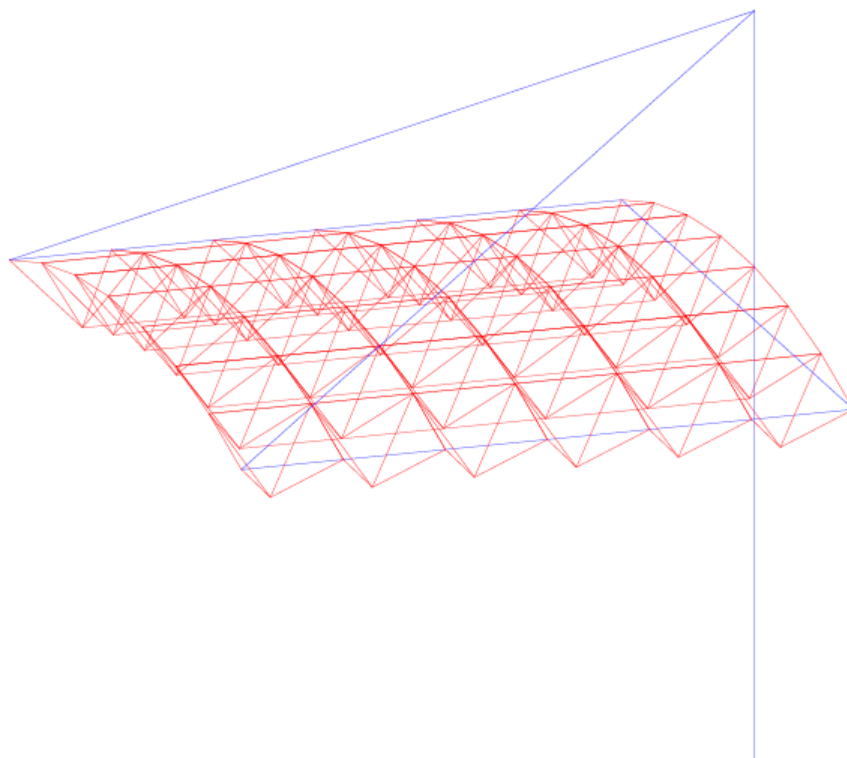
Obrázek 4.3 – Varianta A – Schéma výřezu zastřešení, viz řešení městského stadionu v Třinci

Jedná se o příhradový rošt, který je podepřen v cca 1/4 rozpětí, táhla jsou osazena na konci. Konstrukce využívá své variability a směrem k volnému konci se zmenšuje celková tloušťka konstrukce (délka některých diagonál). To značně přispívá ke snížení vlastní tíhy, výhodnějšího průběhu vnitřních sil a tím hospodárnějšího návrhu celé konstrukce. Řešení je architektonicky zajímavé, zastřešení působí vzdušně. Nevýhodou může být náročnější výroba a montáž z důvodu různých délek (často i různých dimenzí) jednotlivých prutů.

Varianta B

Obrázek 4.4 – Varianta B – Schéma výřezu zastřešení rovinným roštem

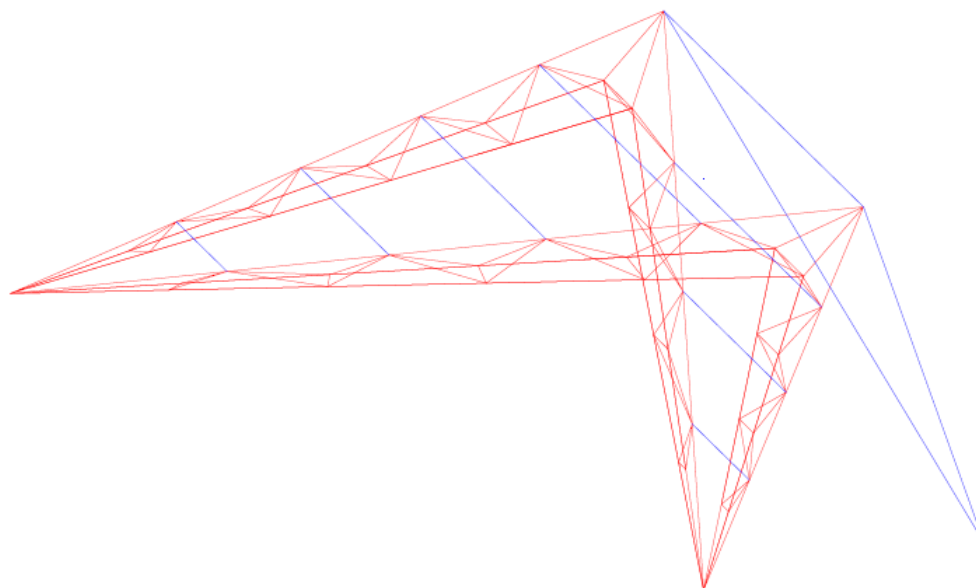
Jde o jednoduchý rošt, kdy je každý dílec po stranách podepřen vodorovnými nosníky kotvenými do sloupů. Z důvodu vznikajících velkých vnitřních sil bývá opět nutno doplnit táhla. Konstrukce je poměrně jednoduchá na výrobu i montáž, bývá tedy rychle zhotovena. Na tento systém se snadno pokládá krytina. Hlavní nevýhodou je nestejněměrné, tím i nevhodné, využití jednotlivých prutů. Konstrukce není architektonicky zvlášť zajímavá, ale i to může být žádoucí např. při nutnosti nenápadného zapasování do krajiny. Táhla nemusí být v každém krajním rohu příhrady, platí však samozřejmě zásada, že čím dále je kotveno od podepření (sloupu), tím více namáháno je a jeho přítomnost je důležitější. Důležitým detailem je spoj sloupu s vodorovným nosným prvkem.

Varianta C

Obrázek 4.5 – Varianta C – Schéma výřezu zastřešení zakřiveným roštem

Tato možnost je velmi podobná variantě B. Rošt tentokrát není rovinný ale zakřivený. Tato možnost může být příznivá nejen z architektonického hlediska, ale i ze statického. Rošt je zde kotven pouze do jednoho sloupu pomocí dvou šikmých táhel. Nevýhodou oproti předešlé variantě je náročnější výroba a montáž.

Varianta D



Obrázek 4.6 – Varianta D – Schéma výřezu zastřešení pomocí nosníků tvořícího rám

V tomto případě není pro zastřešení použit rošt, ale pouze nosný rám z prostorové příhradové konstrukce doplněný příčnými vazbami pro uchycení střešního či obvodového pláště. Jinou variantou může být architektonicky zajímavý způsob nepoužití příčných prvků, ale pouze natažení membránového pláště mezi nosnou prostorovou příhradou. Pokud není kladen nárok na pochozí střechu nebo tužší plášť, jedná se o výhodné využití poměrně malého množství oceli při zastřešení poměrně velké plochy. S tím souvisí i výhody a nevýhody lehkého pláště při dimenzování konstrukce. Samozřejmostí je použití táhla. Důležitým detailem k vyřešení je dostatečně tuhý rámový roh.

4.3 Statický výpočet

4.3.1 Zatížení

Je uvažováno, že na konstrukci působí zatížení stálá (vlastní tíha nosné konstrukce, tíha nenosných částí – střešní plášť) a proměnná (užitná, klimatická – sníh a vítr).

Veškerá stálá a proměnná užitná zatížení jsou uvažována dle ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb [1]. Vlastní tíha nosné konstrukce je vypočtena programem Scia Engineer 18.1 rovněž dle [1]. Klimatické zatížení sněhem je navrženo podle ČSN EN 1991-1-3 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-3: Obecná zatížení - Zatížení sněhem [2], proměnné klimatické zatížení větrem dle ČSN EN 1991-1-4 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem [3]. Při zadávání zatížení do 3D modelu byla zohledněna skutečná poloha působícího zatížení, nikoliv pouze ekvivalentní zatížení do styčníků.

Ostatní stálá zatížení

Střešní plášť – trapézový plech typu VSŽ 10081/0,8 (1012F), charakteristická hodnota
 $g_{k1,2} = 0,0916 \text{ kN/m}^2$

Zatížení na stropnici

$$g_{k1,UPE} = 0,0916 \cdot 1,111 = 0,102 \text{ kN/m} \quad (4.1)$$

$$g_{k2,UPE} = 0,0916 \cdot 0,556 = 0,051 \text{ kN/m} \quad (4.2)$$

Proměnná zatížení – užitná

Zatížení střechy – kategorie H (doporučená hodnota dle národní přílohy ČR), charakteristická hodnota

$$q_{k1,2} = 0,75 \text{ kN/m}^2$$

Zatížení na stropnici

$$q_{k1,UPE} = 0,75 \cdot 1,111 = 0,833 \text{ kN/m} \quad (4.3)$$

$$q_{k2,UPE} = 0,75 \cdot 0,556 = 0,417 \text{ kN/m} \quad (4.4)$$

Užitné zatížení se pro návrh neuplatní, je menší než zatížení sněhem.

Proměnná zatížení – klimatická – sněh

Posuzovaná konstrukce je situovaná ve městě Třinec, který leží ve sněhové oblasti III. Objekt má plochou střechu se sklonem maximálně $4,38^\circ \leq 5^\circ$.

Součinitel expozice – normální typ krajiny

$$C_e = 1$$

Tepelný součinitel

$$C_t = 1$$

Charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi

$$s_k = 1,5 \text{ kN/m}^2$$

Zatížení sněhem rovnoměrně rozloženém po ploše střechy

Tvarový součinitel zatížení sněhem – rovnoměrné zatížení

$$\mu_1 = 0,8$$

Charakteristická hodnota zatížení

$$s_{k1} = \mu_1 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,5 = 1,2 \text{ kN/m}^2 \quad (4.5)$$

Zatížení na stropnici

$$s_{k1,UPE} = 1,2 \cdot 1,111 = 1,333 \text{ kN/m} \quad (4.6)$$

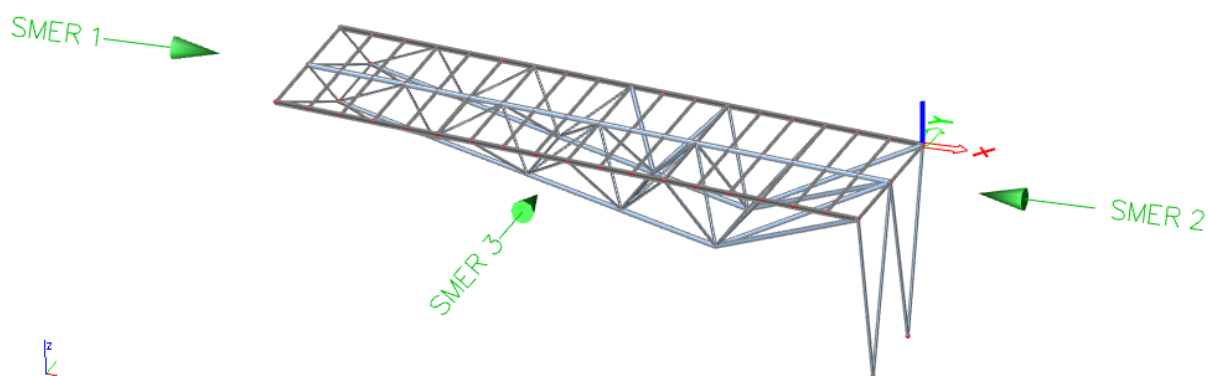
$$s_{k2,UPE} = 1,2 \cdot 0,556 = 0,667 \text{ kN/m} \quad (4.7)$$

Proměnná zatížení – klimatická – vítr

Místo, kde se stavba nachází, spadá do větrné oblasti I. Kategorie terénu se v místě objektu řadí do III (oblast rovnoměrně pokrytá vegetací nebo budovami nebo s izolovanými

překážkami, jejichž vzdálenost je rovna maximálně 20násobku výšky překážky). Rovněž je uvažována plochá střecha se sklonem maximálně $4,38^\circ \leq 5^\circ$.

Zatížení větrem bylo uvažováno dvěma možnými přístupy (zatížení větrem na přístřešek a zatížení větrem na příhradovou konstrukci) uváděnými ve [3]. Dílec, který je modelován, má jednu osu symetrie. Z toho vyplývá, že vítr je potřeba uvažovat ve třech směrech. Na konstrukci tedy vznikne šest zatěžovacích stavů od větru. Tři od sání a tři od tlaku větru na přístřešek, ke každému tomuto stavu se přidá příslušné zatížení na pruty příhradové konstrukce.



č 4.7 – Schéma směrů působícího zatížení větrem na jeden dílec



Obrázek 4.8 – Schéma zvýraznění zatěžovaného dílce při zatížení větrem

Součinitel směru větru

$$c_{dir} = 1$$

Součinitel ročního období

$$c_{season} = 1$$

Výchozí základní rychlost větru

$$v_{b,0} = 22,5 \text{ m/s}$$

Základní rychlost větru

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1 \cdot 1 \cdot 22,5 = 22,5 \text{ m/s} \quad (4.8)$$

Výška nad zemí

$$z = 7,625 \text{ m}$$

Vnější a vnitřní referenční výška

$$z_e = z_i = 7,625 \text{ m}$$

Parametr drsnosti terénu

$$z_0 = 0,3$$

$$z_{0,II} = 0,05$$

Součinitel terénu

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{0,3}{0,05} \right)^{0,07} = 0,215 \quad (4.9)$$

Ověřující podmínka pro výpočet součinitele drsnosti a intenzity turbulence

Maximální výška

$$z_{max} = 200 \text{ m}$$

Minimální výška

$$z_{min} = 5 \text{ m}$$

$$z_{max} = 200 \text{ m} \geq z = 7,625 \text{ m} \geq z_{min} = 5 \text{ m} \quad (4.10)$$

Podmínka splněna, součinitel drsnosti se vypočítá dle vztahu 4.11, intenzita turbulence dle 4.19

Součinitel drsnosti

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,215 \cdot \ln\left(\frac{7,625}{0,3}\right) = 0,696 \quad (4.11)$$

Výška topografického útvaru

$$H = 10 \text{ m}$$

Skutečná délka návětrného svahu

$$L_u = 17 \text{ m}$$

Sklon návětrného svahu

$$\Phi = H/L_u = 10/17 = 0,588 \quad (4.12)$$

→ vliv ortografie nelze zanedbat

$$\rightarrow \text{strmý sklon} \rightarrow \text{efektivní délka návětrného svahu } L_e = H/0,3 = 10/0,3 = 33,33 \text{ m} \quad (4.13)$$

→ výpočet součinitele ortografie pro návětrný svah dle vztahu 4.17

Sklon závětrného svahu

$$\Phi = 0 < 0,05 \quad (4.14)$$

→ vliv ortografie lze zanedbat

Horizontální vzdálenost stavby od vrcholu hřebene

$$x = 0 \text{ m (konzervativně)}$$

$$x/L_e = 0/33,33 = 0 \quad (4.15)$$

$$z/L_e = 7,625/33,33 = 0,229 \quad (4.16)$$

→ ortografický faktor umístění (graf pro útes či skalní stěnu) $s = 0,67$

Součinitel ortografie pro návětrný svah

$$c_o(z) = 1 + 0,6 s = 1 + 0,6 \cdot 0,67 = 1,402 \quad (4.17)$$

Součinitel ortografie pro závětrný svah

$$c_o(z) = 1$$

Součinitel turbulence

$$k_I = 1$$

Hustota vzduchu

$$\rho = 1,250 \text{ kg/m}^3$$

Charakteristická střední rychlost na návětrném větru

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b = 0,695 \cdot 1,402 \cdot 22,5 = 21,92 \text{ m/s} \quad (4.18)$$

Charakteristická střední rychlost na závětrném větru

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b = 0,695 \cdot 1 \cdot 22,5 = 15,64 \text{ m/s} \quad (4.18)$$

Intenzita turbulence na návětrném svahu

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln \frac{z}{z_0}} = \frac{1}{1,402 \cdot \ln \frac{7,625}{0,3}} = 0,220 \quad (4.19)$$

Intenzita turbulence na závětrném svahu

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln \frac{z}{z_0}} = \frac{1}{1 \cdot \ln \frac{7,625}{0,3}} = 0,309 \quad (4.19)$$

Maximální dynamický tlak na návětrném svahu

$$\begin{aligned} q_p(z) &= [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = [1 + 7 \cdot 0,220] \cdot 0,5 \cdot 1,250 \cdot 21,92^2 = \\ &= 762,77 \text{ N/m}^2 = 0,763 \text{ kN/m}^2 \end{aligned} \quad (4.20)$$

Maximální dynamický tlak na závětrném svahu

$$\begin{aligned} q_p(z) &= [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = [1 + 7 \cdot 0,309] \cdot 0,5 \cdot 1,250 \cdot 15,64^2 = \\ &= 483,56 \text{ N/m}^2 = 0,484 \text{ kN/m}^2 \end{aligned} \quad (4.20)$$

Zatížení větrem na přístřešek

Řešení dle [3], kapitola 7.3

Součinitel plnosti

$\varphi = 1$ (konzervativně – na stranu bezpečnou, ve střední části se nachází objekt s potřebným zázemím pro tribunu, který zaujme téměř celou závětrnou plochu)

Součinitelé výsledného tlaku $c_{p,net}$ pro jednotlivé oblasti a součinitelé plnosti

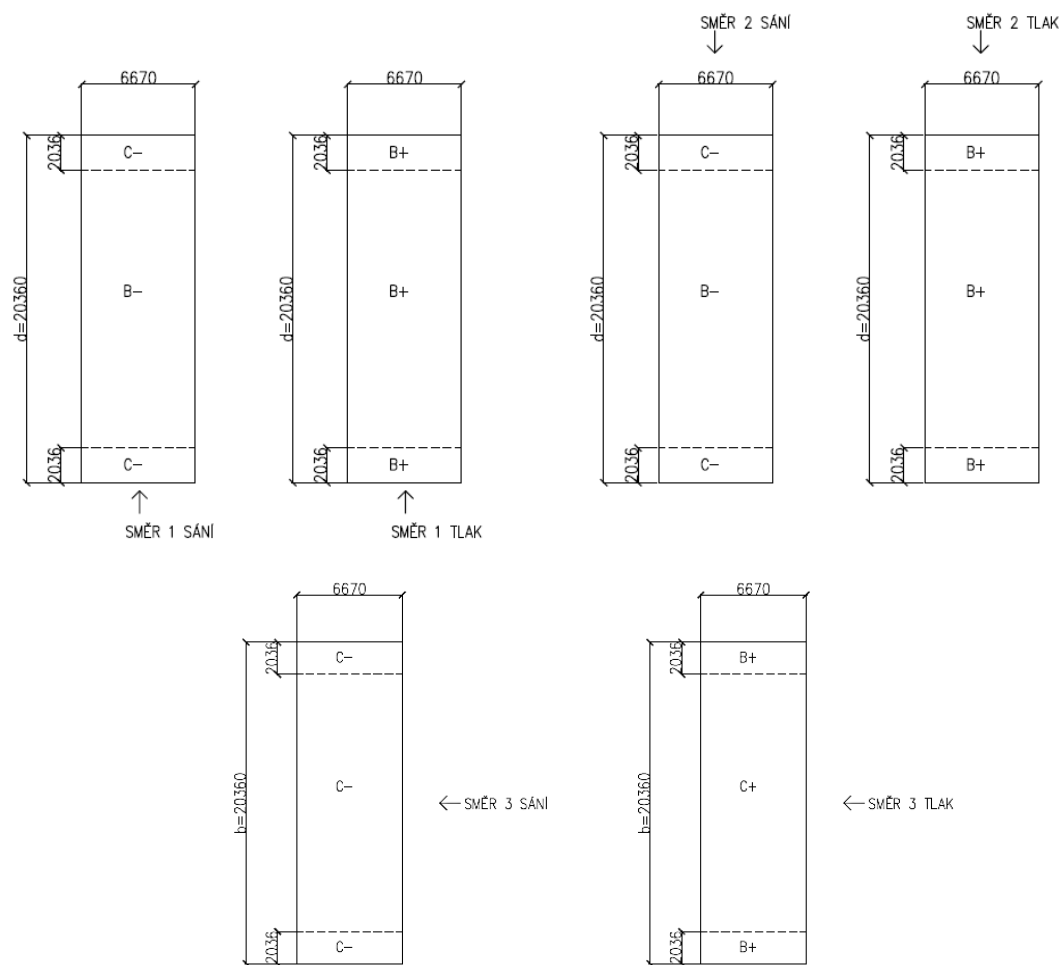
Tabulka 4.1 – Součinitelé plnosti

Oblast	$\varphi = 1$	Maximum všech φ
Oblast A	-1,588	0,763
Oblast B	-2,150	2,063
Oblast C	-2,463	1,275

Výsledný tlak větru dle vztahu $w_{e,1} = q_p(z) \cdot c_{p,net}$ [kN/m²] (4.21)

Tabulka 4.2 – Tlak větru

Oblast	$\varphi = 1$			Maximum všech φ		
Směr	1	2	3	1	2	3
Oblast A	-1,212	-0,769	-0,769	0,582	0,369	0,369
Oblast B	-1,640	-1,041	-1,041	1,574	0,998	0,998
Oblast C	-1,879	-1,192	-1,192	0,973	0,617	0,617



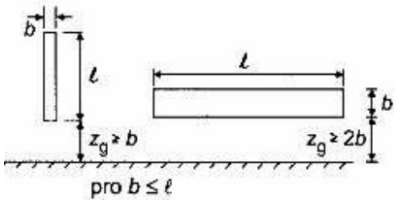
Obrázek 4.9 – Schéma výsledných použitých oblastí pro jednotlivé směry (+ značí tlak, - sání)

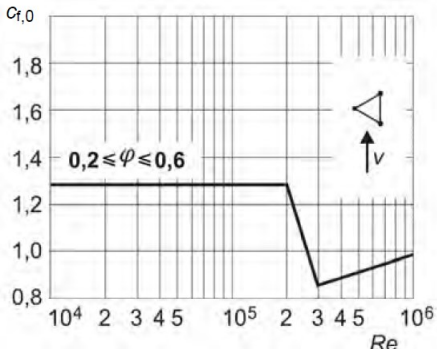
Zatížení větrem na příhradovou konstrukci

Řešení dle [3], kapitola 7.11

Tabulka 4.3 – Výpočet zatížení větrem

	Jednotky	Směr 1	Směr 2	Směr 3	Pozn.
Šířka konstrukce b	m	133	133	20,36	
Výška konstrukce z, h	m	7,625	7,625	7,625	
Kinematická viskozita vzduchu ν	m^2/s	$14,5 \cdot 10^{-6}$	$14,5 \cdot 10^{-6}$	$14,5 \cdot 10^{-6}$	
Maximální rychlost větru	m/s	34,93	27,82	27,82	(4.22)

$v(z_e) = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p(z)}{\rho}}$					
Reynoldsovo číslo pro jednotlivé průměry kruhových trubek b [mm] $Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu}$ $b = 168,3$ $b = 159$ $b = 127$ $b = 114,3$ $b = 101,6$ $b = 76,1$ $b = 63,5$ $b = 60,3$ $b = 57$ $b = 54$	–	405429 383026 305939 275345 244751 183322 152969 145261 137311 130084	322904 305061 243665 219298 194932 146007 121832 115693 109361 103606	322904 305061 243665 219298 194932 146007 121832 115693 109361 103606	(4.23)
Efektivní štíhlost λ  Obrázek 4.10 – Schéma z [3] Pro $l \geq 50 \text{ m min. } (1,4 \cdot l/b; 70)$ Pro $l < 15 \text{ m min. } (2 \cdot l/b; 70)$ Přesto, že nejsou splněny všechny podmínky pro použití, jen tento vztah použít, neboť i tak je to nejvhodnější nástroj pro určení λ , který [3] dává.	– –	48,807	48,807	10,184 (interpo- lace)	(4.24) (4.25)
Plocha představující součet průmětů ploch prutů A styčnickových plechů	m^2	7,555	7,555	14,443	

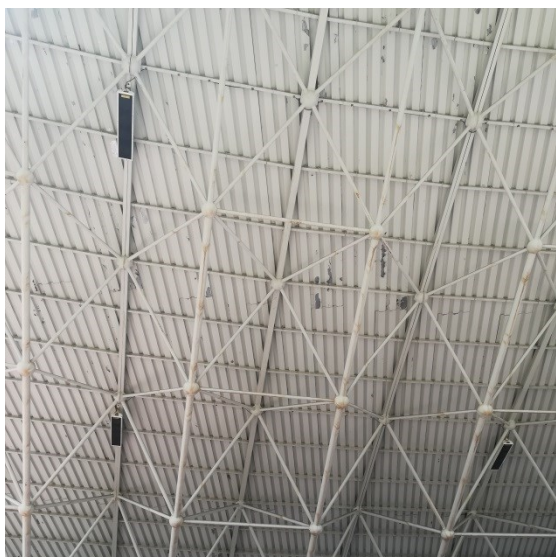
do čelní plochy A					
Plocha ohraničená okraji čelní plochy, promítnutá kolmo k čelní ploše A_c	m^2	31,697	31,697	24,584	
Součinitel plnosti $\varphi = \frac{A}{A_c}$	—	0,238	0,238	0,587	(4.26)
Součinitel síly c_{f0} pro rovinnou a prostorovou příhradovou konstrukci s pruty s kruhovým průřezem pro jednotlivé průměry b [mm]	—				
 <p>Obrázek 4.11 – Uvažované schéma z [3]</p>					
$b = 168,3$		0,850	0,830	0,830	
$b = 159$		0,840	0,827	0,827	
$b = 127$		0,827	1,080	1,080	
$b = 114,3$		0,880	1,200	1,200	
$b = 101,6$		1,100	1,280	1,280	
$b = 76,1$		1,280	1,280	1,280	
$b = 63,5$		1,280	1,280	1,280	
$b = 60,3$		1,280	1,280	1,280	
$b = 57$		1,280	1,280	1,280	
$b = 54$		1,280	1,280	1,280	

Součinitel koncového efektu Ψ_λ	—	0,942	0,942	0,910	
Součinitel síly pro jednotlivé kruhové trubky s průměrem b [mm] $c_f = c_{f,0} \cdot \Psi_\lambda$	—				(4.27)
$b = 168,3$		0,801	0,782	0,755	
$b = 159$		0,791	0,779	0,753	
$b = 127$		0,779	1,017	0,983	
$b = 114,3$		0,829	1,130	1,092	
$b = 101,6$		1,036	1,206	1,165	
$b = 76,1$		1,206	1,206	1,165	
$b = 63,5$		1,206	1,206	1,165	
$b = 60,3$		1,206	1,206	1,165	
$b = 57$		1,206	1,206	1,165	
$b = 54$		1,206	1,206	1,165	
Součinitel konstrukce $c_s c_d$	—	1	1	1	Poze- mní stavba ≤ 15 m
Výsledné zatížení na pruty příhradové konstrukce pro jednotlivé kruhové trubky s průměrem b [mm] $w_{e,2} = q_{p(z)} \cdot b \cdot c_f \cdot c_s c_d$					
$b = 168,3$	kN/m	0,103	0,064	0,062	
$b = 159$		0,096	0,060	0,058	(4.28)
$b = 127$		0,075	0,063	0,060	
$b = 114,3$		0,072	0,063	0,060	
$b = 101,6$		0,080	0,059	0,057	

$b = 76,1$		0,070	0,044	0,043	
$b = 63,5$		0,058	0,037	0,036	
$b = 60,3$		0,055	0,035	0,034	
$b = 57$		0,052	0,033	0,032	
$b = 54$		0,050	0,032	0,030	

4.3.2 Globální numerický model

Globální numerický 3D model je vytvořen ve výpočetním programu Scia Engineer 18.1 pracujícím na základě MKP. Z důvodu zjednodušení modelu a zrychlení výpočtu je modelován pouze jeden stále se opakující dílec s uvážením na stranu bezpečnou. Jedná se o prutový model, na kterém je použito 102 prutů. Jednotlivé pruty představující horní a dolní pásy příhrady, diagonály, táhla a stropnice a jsou vzájemně kloubově propojeny – viz obrázek 4.12. V místech podepření se nacházejí kloubové podpory (bránící posunu ve všech směrech, natočení je ve všech směrech umožněno) – viz obrázek 4.13. Na pozici kotvení táhel je uživatelská podpora (brání pohybu ve všech třech směrech a natočení kolem osy x a z) – viz obrázek 4.14. Situace, že modelovaný dílec nepůsobí samostatně, ale je spojen s ostatními, je simulována podporami bránícími posunu ve směru dalšího dílce. Konkrétně na jednom horním krajním pásu příhrady (vždy v místě napojení stropnic) – viz obrázek 4.15. Pro fungování modelu je nutné správné nastavení dat o vzpěru. Model je vyhodnocen lineární i nelineární analýzou, jejich rozdíly jsou následně porovnány. Průměrná velikost konečného prvku je 1 m, průměrný počet dílků na prutu je jeden. Tato velikost a počet jsou dostačující, při větším počtu menších dílků se model dále nezpřesňuje, pouze se zvyšuje výpočetní náročnost.



Obrázek 4.12 – Kloubové spojení prutů



Obrázek 4.13 – Kloubová podpora



Obrázek 4.14 – Kotvení táhel



Obrázek 4.15 – Návaznost dílců

Nastavení nelineárního modelu

Pro potřeby nelineárního výpočtu je nutné nastavit nelineární kombinace zatížení. Ty byly vytvořeny z lineárních obálek kombinací zatížení pro MSÚ i MSP.

4.3.3 Posouzení na mezní stav únosnosti

Veškeré ocelové prvky konstrukce jsou z oceli S235. Posudky jednotlivých prutů jsou provedeny dle ČSN EN 1993-1-1 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby [4].

Mez kluzu oceli

$$f_y = 235 \text{ MPa}$$

Mez pevnosti oceli

$$f_y = 360 \text{ MPa}$$

Poměrné přetvoření

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1 \quad (4.29)$$

Dílčí součinitel únosnosti průřezu

$$\gamma_{M0} = 1$$

Dílčí součinitel únosnosti průřezu při posuzování stability prutu

$$\gamma_{M1} = 1$$

Modul pružnosti v tahu a tlaku

$$E = 210 \text{ GPa}$$

Modul pružnosti ve smyku

$$G = 81 \text{ GPa}$$

Táhla

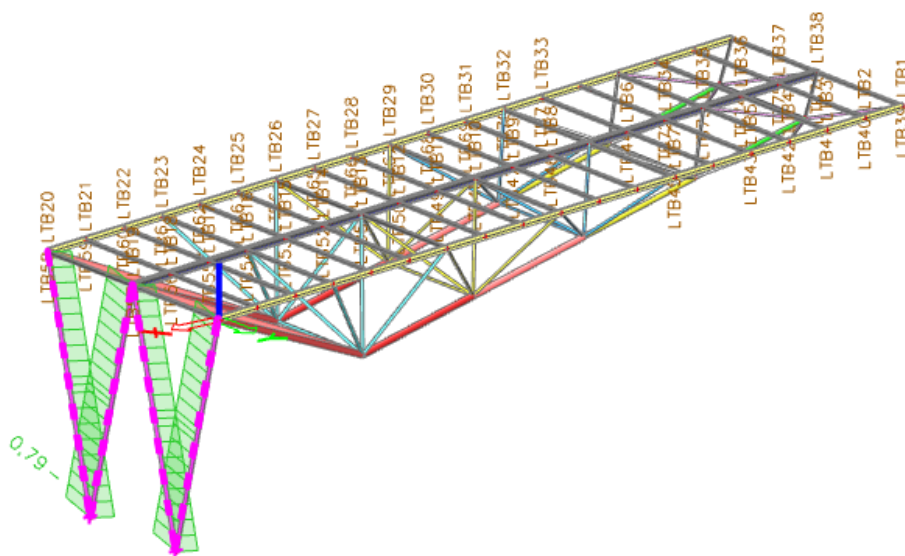
TR KR 101,6 x 6,3 mm

Posudek pomocí Scia Engineer 18.1

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

1 . vlastní tíha + 1 . stálé + 1,5 . vítr ve směru 1 (sání)

Přesto, že primární funkce využití táhla je na tah, při sání větru se táhla stávají tlačnými a jeho využití na vzpěrný tlak je větší, než na tah.



Obrázek 4.16 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Tabulka 4.4 – Posudek na vzpěr pomocí Scia Engineer 18.1

Posudek rovinného vzpěru

Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.1.1 a rovnice (6.46)

Parametry vzpěru	yy	zz	
Typ posuvných styčníků	posuvné	neposuvné	
Systémová délka L	6,320	6,320	m
Součinitel vzpěru k	1,00	1,00	
Vzpěrná délka l_{cr}	6,320	6,320	m
Kritické Eulerovo zatížení N_{cr}	111,57	111,57	kN
Štíhlost λ	187,38	187,38	
Poměrná štíhlost λ_{rel}	2,00	2,00	
Mezní štíhlost $\lambda_{rel,0}$	0,20	0,20	
Vzpěr. křivka	a	a	
Imperfekce α	0,21	0,21	
Redukční součinitel χ	0,22	0,22	
Únosnost na vzpěr $N_{b,Rd}$	99,43	99,44	kN

Posudek rovinného vzpěru		
Průřezová plocha A	1,8900e-03	m ²
Únosnost na vzpěr $N_{b,Rd}$	99,43	kN
Jedn. posudek	0,69	-

Tabulka 4.5 – Posudek na ohyb s osovým tlakem pomocí Scia Engineer 18.1

Posudek ohybu a osového tlaku

Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.3 a rovnice (6.61), (6.62)

Převzato: BČ Čelivský

Parametry pro posudek ohybu a osového tlaku		
Interakční metoda	alternativní metoda 1	
Průřezová plocha A	1,8900e-03	m ²
Plastický modul průřezu $W_{pl,y}$	5,7217e-05	m ³
Plastický modul průřezu $W_{pl,z}$	5,7217e-05	m ³
Návrhová tlaková síla N_{Ed}	68,94	kN
Návrhový ohybový moment (maximum) $M_{y,Ed}$	0,19	kNm
Návrhový ohybový moment (maximum) $M_{z,Ed}$	0,60	kNm
Charakteristická tlaková únosnost N_{Rk}	444,15	kN
Charakteristická momentová únosnost $M_{y,Rk}$	13,45	kNm
Charakteristická momentová únosnost $M_{z,Rk}$	13,45	kNm
Redukční součinitel χ_y	0,22	
Redukční součinitel χ_z	0,22	
Redukční součinitel χ_{LT}	1,00	
Interakční součinitel k_{yy}	1,60	
Interakční součinitel k_{yz}	1,60	
Interakční součinitel k_{zy}	1,60	
Interakční součinitel k_{zz}	1,60	
Parametry interakční metody 1		
Kritické Eulerovo zatížení $N_{cr,y}$	111,57	kN
Kritické Eulerovo zatížení $N_{cr,z}$	111,57	kN
Pružné kritické zatížení $N_{cr,T}$	152653,85	kN
Plastický modul průřezu $W_{pl,y}$	5,7217e-05	m ³
Pružný modul průřezu $W_{el,y}$	4,2300e-05	m ³
Plastický modul průřezu $W_{pl,z}$	5,7217e-05	m ³
Pružný modul průřezu $W_{el,z}$	4,2300e-05	m ³
Moment setrvačnosti I_y	2,1500e-06	m ⁴
Moment setrvačnosti I_z	2,1500e-06	m ⁴
Moment setrvačnosti v prostém kroucení I_t	4,3000e-06	m ⁴
Metoda pro součinitel ekvivalentního momentu $C_{my,0}$	Tabulka A.2 řádek 4 (liniové zatížení)	
Součinitel ekvivalentního momentu $C_{my,0}$	1,02	
Metoda pro součinitel ekvivalentního momentu $C_{mz,0}$	Tabulka A.2 řádek 4 (liniové zatížení)	
Součinitel ekvivalentního momentu $C_{mz,0}$	1,02	
Součinitel μ_y	0,44	
Součinitel μ_z	0,44	
Součinitel ε_y	0,12	
Součinitel α_{LT}	0,00	
Kritický moment pro rovnoměrný ohyb $M_{cr,0}$	196,84	kNm
Poměrná štíhlost $\lambda_{rel,0}$	0,26	
Limitní relativní štíhlost $\lambda_{rel,0,lim}$	0,17	

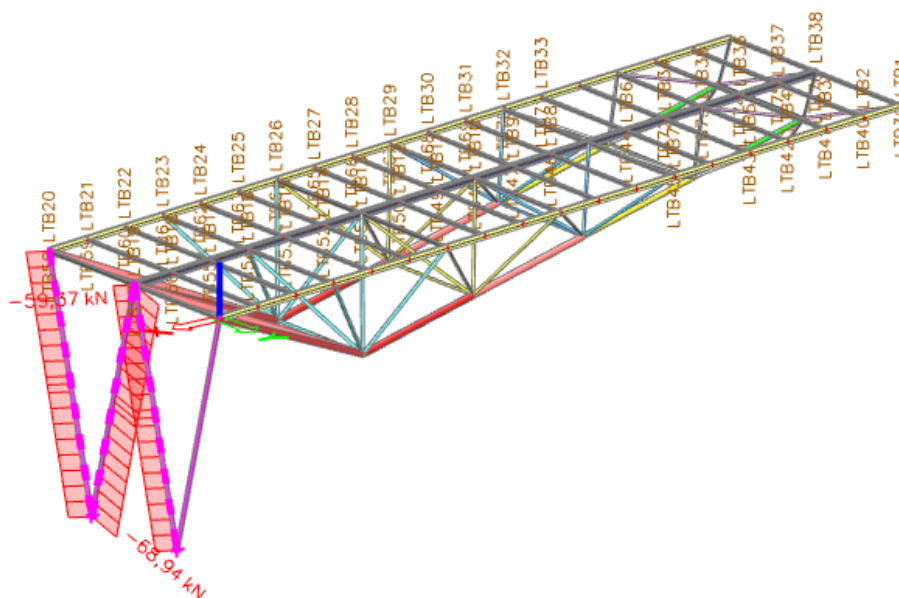
Součinitel ekvivalentního momentu C_{my}	1,02	
Součinitel ekvivalentního momentu C_{mz}	1,02	
Součinitel ekvivalentního momentu C_{mLT}	1,00	
Součinitel b_{LT}	0,00	
Součinitel c_{LT}	0,00	
Součinitel d_{LT}	0,00	
Součinitel e_{LT}	0,00	
Součinitel w_y	1,35	
Součinitel w_z	1,35	
Součinitel n_{pl}	0,16	
Maximální relativní štíhlost $\lambda_{rel,max}$	2,00	
Součinitel C_{yy}	0,74	
Součinitel C_{yz}	0,44	
Součinitel C_{zy}	0,44	
Součinitel C_{zz}	0,74	

Posudek (6.61) = $0,69 + 0,02 + 0,07 = 0,79$ -

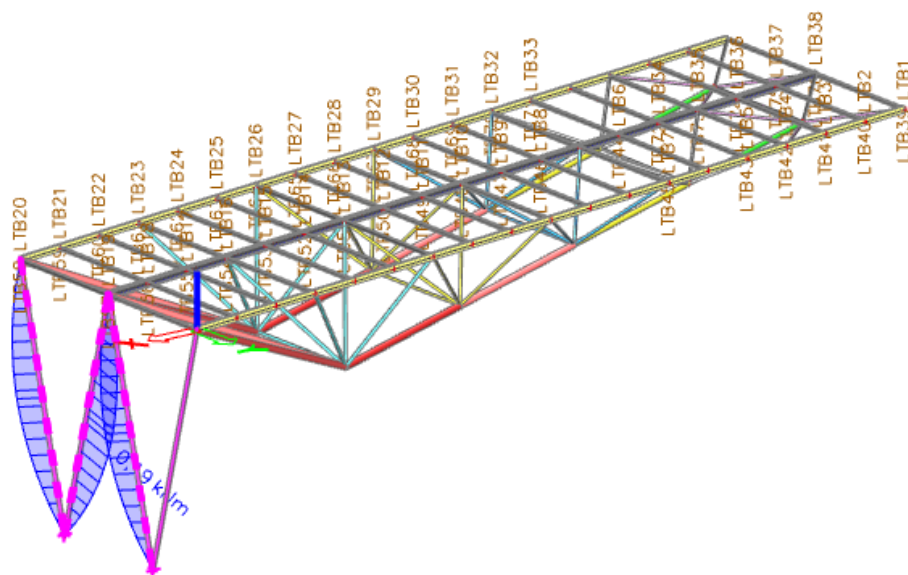
Posudek (6.62) = $0,69 + 0,02 + 0,07 = 0,79$ -

Prvek splňuje podmínky stabilitního posudku.

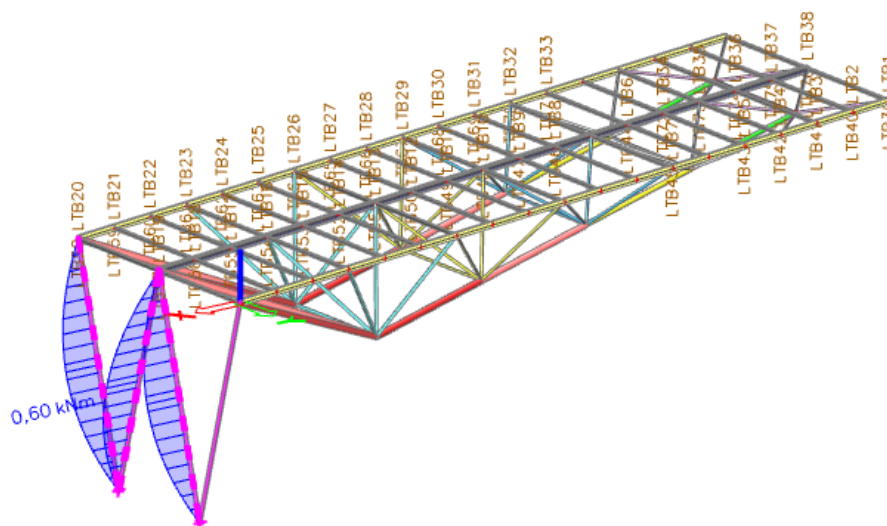
Ruční ověření výpočtu



Obrázek 4.17 – Vnitřní síly (normálové) na táhlech pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez



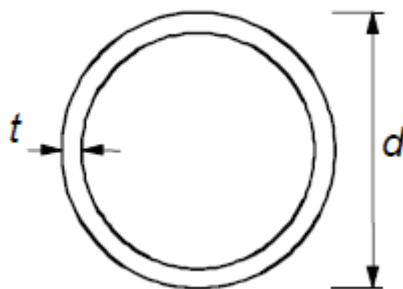
Obrázek 4.18 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru y) na táhlech pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez



Obrázek 4.19 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru z) na táhlech pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez

Zatřídění průřezu

$$\frac{d}{t} = \frac{101,6}{6,3} = 16,127 \leq 50 \varepsilon^2 = 50 \cdot 1^2 = 50 \rightarrow \text{průřez třídy 1} \quad (4.30)$$



Obrázek 4.20 – Vyznačení rozměrů kruhových trubek potřebných pro zatřídění průřezu

Průřezová plocha

$$A = 1,89 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Průřezový modul v elastické a plastické oblasti

$$W_{el} = 4,23 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$W_{pl} = 5,72 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Posouzení na vzpěrný tlak

Návrhová hodnota normálové tlakové síly

$$N_{Ed} = 68,94 \text{ kN}$$

Vzpěrná délka

$$L_{cr} = 6,320 \text{ m}$$

Moment setrvačnosti průřezu

$$I = 2,15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Pružná kritická síla určená pro vlastnosti plného průřezu

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 2,15 \cdot 10^{-6}}{6,320^2} = 111,56 \text{ kN} \quad (4.31)$$

Poměrná štíhlost prutu

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{1,89 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{111,56 \cdot 10^3}} = 1,995 \quad (4.32)$$

Křivka vzpěrné pevnosti a (dutý, za tepla válcovaný průřez), součinitel imperfekce $\alpha = 0,21$.

Hodnota pro výpočet součinitele vzpěrnosti

$$\phi = 0,5[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5[1 + 0,21(1,995 - 0,2) + 1,995^2] = 2,678 \quad (4.33)$$

Součinitel vzpěrnosti pro příslušný způsob vybočení

$$\kappa = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{2,678 + \sqrt{2,678^2 - 1,995^2}} = 0,224 \quad (4.34)$$

Návrhová vzpěrná únosnost tlačeního prutu

$$N_{b,Rd} = \frac{\kappa \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,224 \cdot 1,89 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 99,49 \text{ kN} \quad (4.35)$$

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{68,94}{99,49} = 0,69 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (4.36)$$

Posouzení na vzpěrný tlak spolu s ohybovými momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 0,19 \text{ kNm}$$

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,60 \text{ kNm}$$

Výpočet interakčních součinitelů podle metody 1 z přílohy A normy [4]

Kruhový průřez není náchylný na ztrátu příčné a torzní stability, proto lze uvážit následující:

Součinitel klopení

$$\chi_{LT} = 1$$

Součinitel ekvivalentního konstantního momentu

$$C_{mLT} = 1$$

Součinitel z [4] se rovná součiniteli ekvivalentního konstantního momentu

$$C_{my,0} = C_{my} \quad (4.37)$$

$$C_{mz,0} = C_{mz} \quad (4.38)$$

Charakteristická únosnost v prostém ohybu

$$M_{y,Rk} = M_{z,Rk} = W_{pl} \cdot f_y = 5,7217 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3 = 13,45 \text{ kNm} \quad (4.39)$$

Plastická návrhová únosnost v prostém ohybu

$$M_{pl,y,Rd} = M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{5,7217 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 13,45 \text{ kNm} \quad (4.40)$$

Charakteristická únosnost v prostém tlaku

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 1,89 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^3 = 444,15 \text{ kN} \quad (4.41)$$

Moment tuhosti v prostém kroucení

$$I_t = 4,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Součinitel dle [4]

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I} = 1 - \frac{4,3 \cdot 10^{-6}}{2,15 \cdot 10^{-6}} = 2 \quad (4.42)$$

Součinitelé dle [4]

$$w_y = w_z = \frac{W_{pl}}{W_{el}} = \frac{5,72 \cdot 10^{-5}}{4,23 \cdot 10^{-5}} = 1,35 \leq 1,5 \quad (4.43)$$

Součinitel dle [4]

$$n_{pl} = \frac{\frac{N_{Ed}}{\gamma_{Mo}}}{\frac{N_{Rk}}{1}} = \frac{68,94}{444,15} = 0,155 \quad (4.44)$$

Součinitelé dle [4]

$$\mu_z = \mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}}{1 - \kappa \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} = \frac{1 - \frac{68,94}{111,56}}{1 - 0,224 \cdot \frac{68,94}{111,56}} = 0,443 \quad (4.45)$$

Součinitelé dle [4]

$$c_{mi,0} = c_{my,0} = c_{my} = c_{mz,0} = c_{mz} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} = 1 + 0,03 \frac{68,94}{111,56} = 1,019 \quad (4.46)$$

Poměrná štíhlost

$$\bar{\lambda}_y = \bar{\lambda}_z = \bar{\lambda}_{max} = 1,995 \quad (4.47)$$

Výsečový moment setrvačnosti

$$I_w = 7,1245 \cdot 10^{-42} \text{ m}^6$$

Délka nosníku mezi body zajištěnými proti posunu kolmo z roviny

$$L = 6,320 \text{ m}$$

Součinitelé vzpěrné délky

$$k_w = k_z = 1,0 \quad (4.48)$$

Bezrozměrný parametr kroucení

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w L} \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}} = \frac{\pi}{1,6,320} \sqrt{\frac{210 \cdot 7,1245 \cdot 10^{-42}}{81 \cdot 4,3 \cdot 10^{-6}}} = 1,030 \cdot 10^{-18} \quad (4.49)$$

Souřadnice působíště zatížení vzhledem k těžišti průřezu

$$z_a = 0 \text{ mm}$$

Souřadnice středu smyku vzhledem k těžišti průřezu

$$z_s = 0 \text{ mm}$$

Souřadnice působíště zatížení vzhledem ke středu smyku

$$z_g = z_a - z_s = 0 - 0 = 0 \text{ mm} \quad (4.50)$$

Bezrozměrný parametr působíště zatížení vzhledem ke středu smyku

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z \cdot L} \sqrt{\frac{EI}{GI_t}} = \frac{\pi \cdot 0}{1,0 \cdot 6,320} \sqrt{\frac{210 \cdot 2,15 \cdot 10^{-6}}{81 \cdot 4,3 \cdot 10^{-6}}} = 0 \quad (4.51)$$

Rozměr dle [4]

$z_j = 0$ pro průřezy symetrické dle osy $y - y$

Bezrozměrný parametr nesymetrie průřezu

$$\zeta_j = \frac{\pi \cdot z_j}{k_z \cdot L} \sqrt{\frac{EI}{GI_t}} = \frac{\pi \cdot 0}{1,0 \cdot 6,320} \sqrt{\frac{210 \cdot 2,15 \cdot 10^{-6}}{81 \cdot 4,3 \cdot 10^{-6}}} = 0 \quad (4.52)$$

Součinitelé závisející na zatížení a podmínkách uložení konců

$$C_1 = 1; C_2 = 1; C_3 = 1$$

Bezrozměrný kritický moment

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \kappa_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j)^2} - (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j) \right] = \quad (4.53)$$

$$\frac{1}{1} \left[\sqrt{1 + (1,030 \cdot 10^{-18})^2 + (1,0 - 1,0)^2} - (1,0 - 1,0) \right] = 1,000$$

Pružný kritický moment

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{EI GI_t}}{L} = 1,0 \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^6 \cdot 2,15 \cdot 10^{-6} \cdot 81 \cdot 10^6 \cdot 4,3 \cdot 10^{-6}}}{6,320} = \quad (4.54)$$

$$= 197,12 \text{ kNm}$$

Poměrná štíhlost při klopení od konstantního ohybového momentu pro poměr koncových momentů $\Psi = 1$

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{M_{z,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{13,45}{197,12}} = 0,260 \quad (4.55)$$

Součinitelé dle [4]

$$b_{LT} = 0,5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^2 \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = 0,5 \cdot 2 \cdot 0,26^2 \cdot \frac{0,19}{1,13,45} \cdot \frac{0,60}{13,45} = \quad (4,56)$$

$$= 4,260 \cdot 10^{-5}$$

$$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{c_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} = 10 \cdot 2 \cdot \frac{0,26^2}{5 + 1,995^4} \cdot \frac{0,19}{1,019 \cdot 1 \cdot 13,45} = \quad (4,57)$$

$$= 8,993 \cdot 10^{-4}$$

$$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{c_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{c_{mz} \cdot M_{pl,z,Rd}} = \quad (4,58)$$

$$= 2 \cdot 2 \cdot \frac{0,26}{0,1 + 1,995^4} \cdot \frac{0,19}{1,019 \cdot 1 \cdot 13,45} \cdot \frac{0,60}{1,019 \cdot 13,45} = 3,961 \cdot 10^{-5}$$

$$e_{LT} = 1,7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{c_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} = \quad (4,59)$$

$$= 1,7 \cdot 2 \cdot \frac{0,26}{0,1 + 1,995^4} \cdot \frac{0,19}{1,019 \cdot 1 \cdot 13,45} = 7,688 \cdot 10^{-4}$$

$$c_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} c_{my}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_y} c_{my}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] = \quad (4,60)$$

$$1 + (1,35 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,35} 1,019^2 \cdot 1,995 - \frac{1,6}{1,35} 1,019^2 \cdot 1,995^2 \right) 0,155 - 4,260 \cdot 10^{-5} \right] =$$

$$= 0,710 \geq \frac{W_{el}}{W_{pl}} = \frac{4,23 \cdot 10^{-5}}{5,72 \cdot 10^{-5}} = 0,740 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,740$$

$$c_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{c_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] = \quad (4,61)$$

$$1 + (1,35 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,019^2 \cdot 1,995^2}{1,35^5} \right) 0,155 - 8,993 \cdot 10^{-4} \right] =$$

$$= 0,408 \geq 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \cdot \frac{W_{el}}{W_{pl}} = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,35}{1,35} \cdot \frac{4,23 \cdot 10^{-5}}{5,72 \cdot 10^{-5}}} = 0,444 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,444$$

$$c_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{c_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] = \quad (4.62)$$

$$1 + (1,35 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,019^2 \cdot 1,995^2}{1,35^5} \right) 0,155 - 3,961 \cdot 10^{-5} \right] =$$

$$= 0,408 \geq 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \cdot \frac{W_{el}}{W_{pl}} = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,35}{1,35}} \cdot \frac{4,23 \cdot 10^{-5}}{5,72 \cdot 10^{-5}} = 0,444 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,444$$

$$c_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} c_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_z} c_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - e_{LT} \right] = \quad (4.63)$$

$$= 1 + (1,35 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,35} 1,019^2 \cdot 1,995 - \frac{1,6}{1,35} 1,019^2 \cdot 1,995^2 \right) 0,155 - 5,914 \cdot 10^{-4} \right] =$$

$$= 0,709 \geq \frac{W_{el}}{W_{pl}} = \frac{4,23 \cdot 10^{-5}}{5,72 \cdot 10^{-5}} = 0,740 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,740$$

Interakční součinitelé

$$k_{yy} = c_{my} \cdot c_{mLT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \frac{1}{c_{yy}} = 1,019 \cdot 1 \cdot \frac{0,443}{1 - \frac{68,94}{111,56}} \cdot \frac{1}{0,740} = 1,597 \quad (4.64)$$

$$k_{yz} = c_{mz} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \frac{1}{c_{yz}} 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} = 1,019 \cdot \frac{0,443}{1 - \frac{68,94}{111,56}} \cdot \frac{1}{0,444} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,35}{1,35}} = 1,597 \quad (4.65)$$

$$k_{zy} = c_{my} \cdot c_{mLT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \frac{1}{c_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} = 1,019 \cdot 1 \cdot \frac{0,443}{1 - \frac{68,94}{111,56}} \cdot \frac{1}{0,444} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,35}{1,35}} = \quad (4.66)$$

$$= 1,597$$

$$k_{zz} = c_{mz} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \frac{1}{c_{zz}} = 1,019 \cdot \frac{0,443}{1 - \frac{68,94}{111,56}} \cdot \frac{1}{0,740} = 1,597 \quad (4.67)$$

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.68)$$

$$\frac{68,94}{\frac{0,224 \cdot 445,15}{1}} + 1,597 \cdot \frac{0,19}{\frac{1 \cdot 13,45}{1}} + 1,597 \cdot \frac{0,60}{\frac{1 \cdot 13,45}{1}} = 0,79 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Součinitelé k_{zy} a k_{zz} jsou stejné jako k_{yy} a k_{yz} , proto je posouzení ve směru z naprosto stejné a není zde uvedeno. Vlivem ohybových momentů (působících společně se vzpěrem) se tedy sníží únosnost průřezu o 10 %

Porovnání výpočtu interakčních součinitelů podle metody 2 z přílohy B normy [4] získaných ze Scia Engineer 18.1.

Tabulka 4.6 – Interakční součinitelé podle metody 2 získané ze Scia Engineer 18.1

Posudek ohybu a osového tlaku

Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.3 a rovnice (6.61), (6.62)

Parametry pro posudek ohybu a osového tlaku		
Interakční metoda	alternativní metoda 2	
Průřezová plocha A	1,8900e-03	m ²
Plastický modul průřezu $W_{pl,y}$	5,7217e-05	m ³
Plastický modul průřezu $W_{pl,z}$	5,7217e-05	m ³
Návrhová tlaková síla N_{Ed}	68,94	kN
Návrhový ohybový moment (maximum) $M_{y,Ed}$	0,19	kNm
Návrhový ohybový moment (maximum) $M_{z,Ed}$	0,60	kNm
Charakteristická tlaková únosnost N_{Rk}	444,15	kN
Charakteristická momentová únosnost $M_{y,Rk}$	13,45	kNm
Charakteristická momentová únosnost $M_{z,Rk}$	13,45	kNm
Redukční součinitel χ_y	0,22	
Redukční součinitel χ_z	0,22	
Redukční součinitel χ_{yz}	1,00	
Interakční součinitel k_{yy}	1,40	
Interakční součinitel k_{yz}	1,12	
Interakční součinitel k_{zy}	0,84	
Interakční součinitel k_{zz}	1,87	

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.68)$$

$$\frac{68,94}{\frac{0,224 \cdot 445,15}{1}} + 1,40 \cdot \frac{0,19}{\frac{1 \cdot 13,45}{1}} + 1,12 \cdot \frac{0,60}{\frac{1 \cdot 13,45}{1}} = 0,76 \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\kappa \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\kappa_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\kappa_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.69)$$

$$\frac{68,94}{\frac{0,224 \cdot 445,15}{1}} + 0,84 \cdot \frac{0,19}{\frac{1 \cdot 13,45}{1}} + 1,87 \cdot \frac{0,60}{\frac{1 \cdot 13,45}{1}} = 0,79 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Výsledky obou metod jsou velmi podobné a drobný rozdíl je očekávaný.

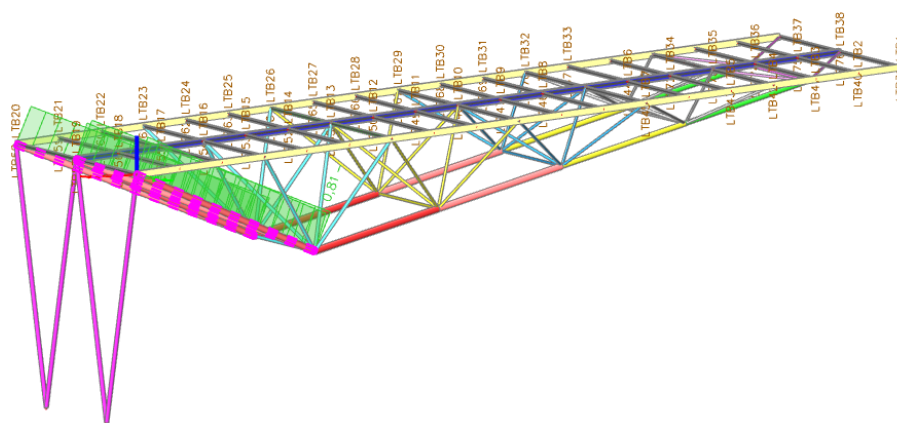
Diagonála

TR KR 159 x 6,3 mm

Posudek pomocí Scia Engineer 18.1

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

1,35 · vlastní tíha + 1,35 · stálé + 0,75 · sníh + 1,5 · vítr ve směru 1 (tlak)



Obrázek 4.21 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Tabulka 4.7 – Posudek na vzpěr pomocí Scia Engineer 18.1

Posudek rovinného vzpěru

Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.1.1 a rovnice (6.46)

Parametry vzpěru	yy	zz	
Typ posuvných styčníků	posuvné	neposuvné	
Systémová délka L	6,127	6,127	m
Součinitel vzpěru k	1,00	1,00	
Vzpěrná délka l_{cr}	6,127	6,127	m
Kritické Eulerovo zatížení N_{cr}	486,92	486,95	kN
Štíhlost λ	113,38	113,38	
Poměrná štíhlost λ_{rel}	1,21	1,21	
Mezní štíhlost $\lambda_{rel,0}$	0,20	0,20	
Vzpěr. křivka	a	a	
Imperfekce α	0,21	0,21	
Redukční součinitel χ	0,53	0,53	
Únosnost na vzpěr $N_{b,Rd}$	372,89	372,91	kN

Posudek rovinného vzpěru		
Průřezová plocha A	3,0200e-03	m ²
Únosnost na vzpěr $N_{b,Rd}$	372,89	kN
Jedn. posudek	0,73	-

Tabulka 4.8 – Posudek na ohyb s osovým tlakem pomocí Scia Engineer 18.1

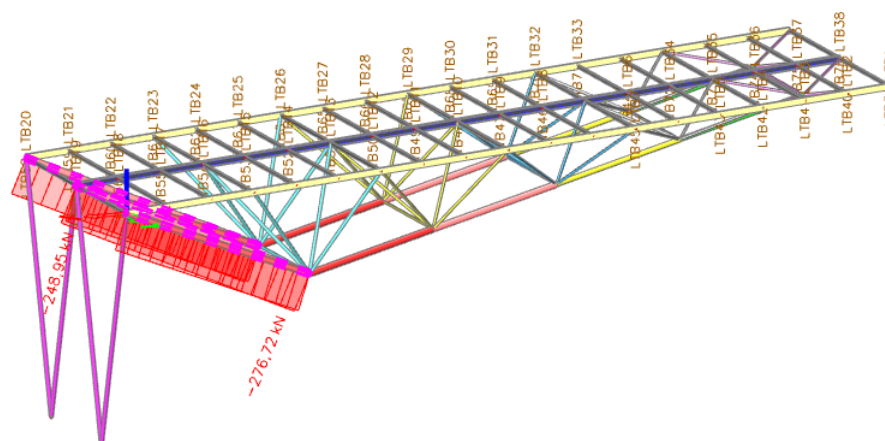
Parametry pro posudek ohybu a osového tlaku		
Interakční metoda	alternativní metoda 1	
Průřezová plocha A	3,0200e-03	m ²
Plastický modul průřezu $W_{pl,y}$	1,4690e-04	m ³
Plastický modul průřezu $W_{pl,z}$	1,4690e-04	m ³
Návrhová tlaková síla N_{Ed}	276,72	kN
Návrhový ohybový moment (maximum) $M_{y,Ed}$	1,13	kNm
Návrhový ohybový moment (maximum) $M_{z,Ed}$	0,20	kNm
Charakteristická tlaková únosnost N_{Rk}	709,70	kN
Charakteristická momentová únosnost $M_{y,Rk}$	34,52	kNm
Charakteristická momentová únosnost $M_{z,Rk}$	34,52	kNm
Redukční součinitel χ_y	0,53	
Redukční součinitel χ_z	0,53	
Redukční součinitel χ_{LT}	1,00	
Interakční součinitel k_{yy}	1,74	
Interakční součinitel k_{yz}	1,46	
Interakční součinitel k_{zy}	1,46	
Interakční součinitel k_{zz}	1,74	
Parametry interakční metody 1		
Kritické Eulerovo zatížení $N_{cr,y}$	486,92	kN
Kritické Eulerovo zatížení $N_{cr,z}$	486,95	kN
Pružné kritické zatížení $N_{cr,T}$	243923,08	kN
Plastický modul průřezu $W_{pl,y}$	1,4690e-04	m ³
Pružný modul průřezu $W_{el,y}$	1,1100e-04	m ³
Plastický modul průřezu $W_{pl,z}$	1,4690e-04	m ³
Pružný modul průřezu $W_{el,z}$	1,1100e-04	m ³
Moment setrvačnosti I_y	8,8200e-06	m ⁴
Moment setrvačnosti I_z	8,8200e-06	m ⁴
Moment setrvačnosti v prostém kroucení I_t	1,7640e-05	m ⁴
Metoda pro součinitel ekvivalentního momentu $C_{my,0}$	Tabulka A.2 řádek 4 (liniové zatížení)	
Součinitel ekvivalentního momentu $C_{my,0}$	1,02	
Metoda pro součinitel ekvivalentního momentu $C_{mz,0}$	Tabulka A.2 řádek 4 (liniové zatížení)	
Součinitel ekvivalentního momentu $C_{mz,0}$	1,02	
Součinitel μ_y	0,62	
Součinitel μ_z	0,62	
Součinitel e_y	0,11	
Součinitel a_{LT}	0,00	
Parametry interakční metody 1		
Kritický moment pro rovnoměrný ohyb $M_{cr,0}$	832,92	kNm
Poměrná štíhlost $\lambda_{rel,0}$	0,20	
Limitní relativní štíhlost $\lambda_{rel,0,lim}$	0,17	
Součinitel ekvivalentního momentu C_{my}	1,02	
Součinitel ekvivalentního momentu C_{mz}	1,02	
Součinitel ekvivalentního momentu C_{mLT}	1,00	
Součinitel b_{LT}	0,00	
Součinitel c_{LT}	0,00	
Součinitel d_{LT}	0,00	
Součinitel e_{LT}	0,00	
Součinitel w_y	1,32	
Součinitel w_z	1,32	
Součinitel η_{pl}	0,39	
Maximální relativní štíhlost $\lambda_{rel,max}$	1,21	
Součinitel C_{yy}	0,83	
Součinitel C_{yz}	0,60	
Součinitel C_{zy}	0,60	
Součinitel C_{zz}	0,83	

Posudek (6.61) = 0,74 + 0,06 + 0,01 = 0,81 -

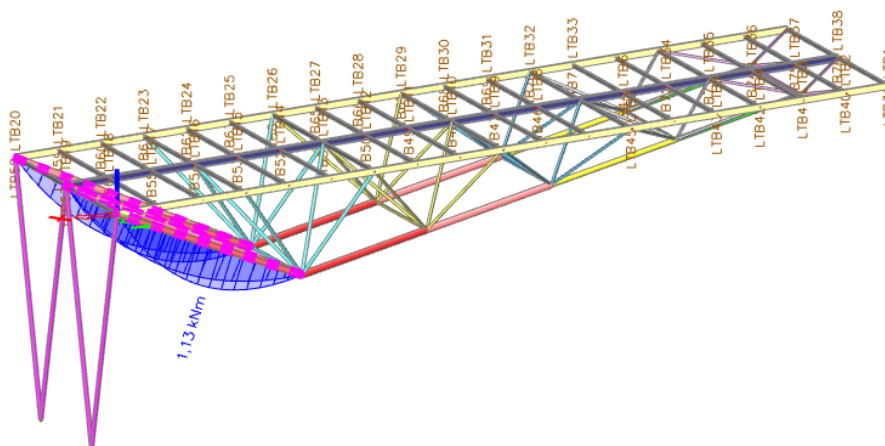
Posudek (6.62) = 0,74 + 0,05 + 0,01 = 0,80 -

Prvek splňuje podmínky stabilního posudku.

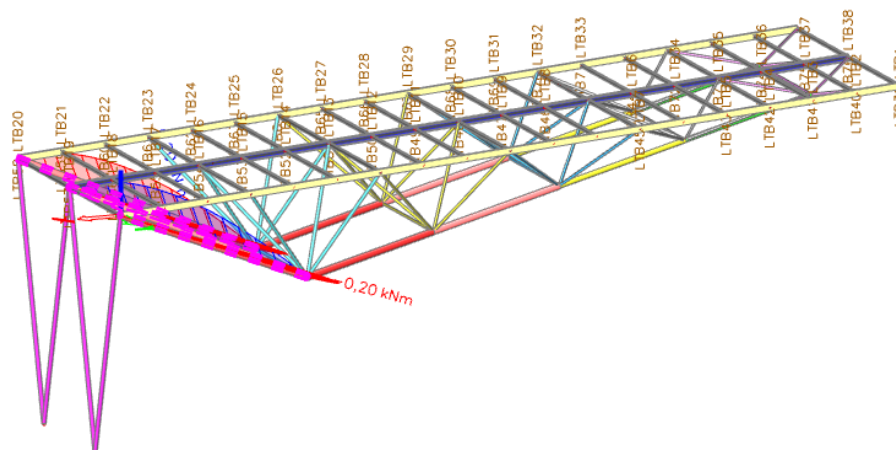
Ruční ověření výpočtu



Obrázek 4.22 – Vnitřní síly (normálové) na diagonálách pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez



Obrázek 4.23 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru y) na diagonálách pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez



Obrázek 4.24 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru z) na diagonálách pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez

Zatřídění průřezu

$$\frac{d}{t} = \frac{159}{6,3} = 25,286 \leq 50 \varepsilon^2 = 50 \cdot 1^2 = 50 \rightarrow \text{průřez třídy 1} \quad (4.30)$$

Průřezová plocha

$$A = 3,02 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Průřezový modul v elastické a plastické oblasti

$$W_{el} = 11,1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$W_{pl} = 14,69 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Posouzení na vzpěrný tlak

Návrhová hodnota normálové tlakové síly

$$N_{Ed} = 276,72 \text{ kN}$$

Vzpěrná délka

$$L_{cr} = 6,127 \text{ m}$$

Moment setrvačnosti průřezu

$$I = 8,82 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Pružná kritická síla určená pro vlastnosti plného průřezu

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 8,82 \cdot 10^{-6}}{6,127^2} = 486,96 \text{ kN} \quad (4.31)$$

Poměrná štíhlost prutu

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{3,02 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{486,96 \cdot 10^3}} = 1,207 \quad (4.32)$$

Křivka vzpěrné pevnosti a (dutý, za tepla válcovaný průřez), součinitel imperfekce $\alpha = 0,21$.

Hodnota pro výpočet součinitele vzpěrnosti

$$\phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5[1 + 0,21(1,207 - 0,2) + 1,207^2] = 1,334 \quad (4.33)$$

Součinitel vzpěrnosti pro příslušný způsob vybočení

$$\kappa = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,334 + \sqrt{1,334^2 - 1,207^2}} = 0,526 \quad (4.34)$$

Návrhová vzpěrná únosnost tlačeního prutu

$$N_{b,Rd} = \frac{\kappa \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,526 \cdot 3,02 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 373,30 \text{ kN} \quad (4.35)$$

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{276,72}{373,30} = 0,74 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (4.36)$$

Posouzení na vzpěrný tlak spolu s ohybovými momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 1,13 \text{ kNm}$$

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,20 \text{ kNm}$$

Výpočet interakčních součinitelů podle metody 1 z přílohy A normy [4]

Kruhový průřez není náchylný na ztrátu příčné a torzní stability, proto lze uvážit následující:

Součinitel klopení

$$\chi_{LT} = 1$$

Součinitel ekvivalentního konstantního momentu

$$C_{mLT} = 1$$

Součinitel z [4] se rovná součiniteli ekvivalentního konstantního momentu

$$C_{my,0} = C_{my} \quad (4.37)$$

$$C_{mz,0} = C_{mz} \quad (4.38)$$

Charakteristická únosnost v prostém ohybu

$$M_{y,Rk} = M_{z,Rk} = W_{pl} \cdot f_y = 14,69 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3 = 34,52 \text{ kNm} \quad (4.39)$$

Plastická návrhová únosnost v prostém ohybu

$$M_{pl,y,Rd} = M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{14,69 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 34,52 \text{ kNm} \quad (4.40)$$

Charakteristická únosnost v prostém tlaku

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 3,02 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^3 = 709,70 \text{ kN} \quad (4.41)$$

Moment tuhosti v prostém kroucení

$$I_t = 17,64 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Součinitel dle [4]

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I} = 1 - \frac{17,64 \cdot 10^{-6}}{8,82 \cdot 10^{-6}} = 2 \quad (4.42)$$

Součinitelé dle [4]

$$w_y = w_z = \frac{W_{pl}}{W_{el}} = \frac{14,69 \cdot 10^{-5}}{11,10 \cdot 10^{-5}} = 1,32 \leq 1,5 \quad (4.43)$$

Součinitel dle [4]

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rk}}{\gamma_{Mo}}} = \frac{276,72}{\frac{709,70}{1}} = 0,390 \quad (4.44)$$

Součinitelé dle [4]

$$\mu_z = \mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}}{1 - \kappa \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} = \frac{1 - \frac{276,72}{486,92}}{1 - 0,526 \cdot \frac{276,72}{486,92}} = 0,616 \quad (4.45)$$

Součinitelé dle [4]

$$c_{mi,0} = c_{my,0} = c_{my} = c_{mz,0} = c_{mz} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} = 1 + 0,03 \frac{276,72}{486,92} = 1,018 \quad (4.46)$$

Poměrná štíhlost

$$\bar{\lambda}_y = \bar{\lambda}_z = \bar{\lambda}_{max} = 1,207 \quad (4.47)$$

Výsečový moment setrvačnosti

$$I_w = 1,4723 \cdot 10^{-40} \text{ m}^6$$

Délka nosníku mezi body zajištěnými proti posunu kolmo z roviny

$$L = 6,127 \text{ m}$$

Součinitelé vzpěrné délky

$$k_w = k_z = 1,0 \quad (4.48)$$

Bezrozměrný parametr kroucení

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w L} \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}} = \frac{\pi}{1,6,127} \sqrt{\frac{210 \cdot 1,4723 \cdot 10^{-40}}{81 \cdot 17,64 \cdot 10^{-6}}} = 2,85 \cdot 10^{-18} \quad (4.49)$$

Souřadnice působíště zatížení vzhledem k těžišti průřezu

$$z_a = 0 \text{ mm}$$

Souřadnice středu smyku vzhledem k těžišti průřezu

$$z_s = 0 \text{ mm}$$

Souřadnice působíště zatížení vzhledem ke středu smyku

$$z_g = z_a - z_s = 0 - 0 = 0 \text{ mm} \quad (4.50)$$

Bezrozměrný parametr působíště zatížení vzhledem ke středu smyku

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z \cdot L} \sqrt{\frac{EI}{GI_t}} = \frac{\pi \cdot 0}{1,0 \cdot 6,127} \sqrt{\frac{210 \cdot 8,82 \cdot 10^{-6}}{81 \cdot 17,64 \cdot 10^{-6}}} = 0 \quad (4.51)$$

Rozměr dle [4]

$z_j = 0$ pro průřezy symetrické dle osy $y - y$

Bezrozměrný parametr nesymetrie průřezu

$$\zeta_j = \frac{\pi \cdot z_j}{k_z \cdot L} \sqrt{\frac{EI}{GI_t}} = \frac{\pi \cdot 0}{1,0 \cdot 6,127} \sqrt{\frac{210 \cdot 8,82 \cdot 10^{-6}}{81 \cdot 17,64 \cdot 10^{-6}}} = 0 \quad (4.52)$$

Součinitele závislé na zatížení a podmínkách uložení konců

$$C_1 = 1; C_2 = 1; C_3 = 1$$

Bezrozměrný kritický moment

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \kappa_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j)^2} - (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j) \right] = \quad (4.53)$$

$$\frac{1}{1} \left[\sqrt{1 + (2,85 \cdot 10^{-18})^2 + (1,0 - 1,0)^2} - (1,0 - 1,0) \right] = 1,000$$

Pružný kritický moment

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{EI GI_t}}{L} = 1 \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^6 \cdot 8,82 \cdot 10^{-6} \cdot 81 \cdot 10^6 \cdot 17,64 \cdot 10^{-6}}}{6,127} = \quad (4.54)$$

$$= 834,14 \text{ kNm}$$

Poměrná štíhlost při klopení od konstantního ohybového momentu pro poměr koncových momentů $\Psi = 1$

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{M_{z,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{34,52}{834,14}} = 0,203 \quad (4.55)$$

Součinitelé dle [4]

$$b_{LT} = 0,5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^2 \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = 0,5 \cdot 2 \cdot 0,203^2 \cdot \frac{1,13}{1,34,52} \cdot \frac{0,2}{34,52} = \quad (4.56)$$

$$= 7,816 \cdot 10^{-6}$$

$$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{c_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} = 10 \cdot 2 \cdot \frac{0,203^2}{5 + 1,207^4} \cdot \frac{1,13}{1,018 \cdot 1 \cdot 34,52} = \quad (4.57)$$

$$= 3,721 \cdot 10^{-3}$$

$$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{c_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{c_{mz} \cdot M_{pl,z,Rd}} = \quad (4.58)$$

$$= 2 \cdot 2 \cdot \frac{0,203}{0,1 + 1,207^4} \cdot \frac{1,13}{1,018 \cdot 1 \cdot 34,52} \cdot \frac{0,2}{1,013 \cdot 34,52} = 6,720 \cdot 10^{-5}$$

$$e_{LT} = 1,7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{c_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} = \quad (4.59)$$

$$= 1,7 \cdot 2 \cdot \frac{0,203}{0,1 + 1,207^4} \cdot \frac{1,13}{1,018 \cdot 1 \cdot 34,52} = 9,986 \cdot 10^{-3}$$

$$c_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} c_{my}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_y} c_{my}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] = \quad (4.60)$$

$$1 + (1,32 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,32} 1,018^2 \cdot 1,207 - \frac{1,6}{1,32} 1,018^2 \cdot 1,207^2 \right) 0,390 - 7,816 \cdot 10^{-6} \right] =$$

$$= 0,832 \geq \frac{W_{el}}{W_{pl}} = \frac{11,1 \cdot 10^{-5}}{14,69 \cdot 10^{-5}} = 0,756 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,832$$

$$c_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{c_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] = \quad (4.61)$$

$$1 + (1,32 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,018^2 \cdot 1,207^2}{1,32^5} \right) 0,390 - 3,721 \cdot 10^{-3} \right] =$$

$$= 0,590 \geq 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \cdot \frac{W_{el}}{W_{pl}} = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,32}{1,32}} \cdot \frac{11,1 \cdot 10^{-5}}{14,69 \cdot 10^{-5}} = 0,453 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,590$$

$$c_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{c_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] = \quad (4.62)$$

$$1 + (1,32 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,018^2 \cdot 1,207^2}{1,32^5} \right) 0,390 - 6,720 \cdot 10^{-5} \right] =$$

$$= 0,591 \geq 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_y}{w_z} \cdot \frac{W_{el}}{W_{pl}}} = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,32}{1,32} \cdot \frac{11,1 \cdot 10^{-5}}{14,69 \cdot 10^{-5}}} = 0,453 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,591$$

$$c_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} c_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_z} c_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - e_{LT} \right] = \quad (4.63)$$

$$= 1 + (1,32 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,32} 1,018^2 \cdot 1,207 - \frac{1,6}{1,32} 1,018^2 \cdot 1,207^2 \right) 0,390 - 9,986 \cdot 10^{-3} \right] =$$

$$= 0,829 \geq \frac{W_{el}}{W_{pl}} = \frac{11,1 \cdot 10^{-5}}{14,69 \cdot 10^{-5}} = 0,756 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,829$$

Interakční součinitelé

$$k_{yy} = c_{my} \cdot c_{mLT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \frac{1}{c_{yy}} = 1,018 \cdot 1 \cdot \frac{0,616}{1 - \frac{276,72}{486,92}} \cdot \frac{1}{0,832} = 1,746 \quad (4.64)$$

$$k_{yz} = c_{mz} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \frac{1}{c_{yz}} 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} = 1,018 \cdot \frac{0,616}{1 - \frac{276,72}{486,92}} \cdot \frac{1}{0,590} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,32}{1,32}} = 1,477 \quad (4.65)$$

$$k_{zy} = c_{my} \cdot c_{mLT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \frac{1}{c_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} = 1,018 \cdot 1 \cdot \frac{0,616}{1 - \frac{276,72}{486,92}} \cdot \frac{1}{0,591} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,32}{1,32}} = \quad (4.66)$$

$$= 1,470$$

$$k_{zz} = c_{mz} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \frac{1}{c_{zz}} = 1,018 \cdot \frac{0,616}{1 - \frac{276,72}{486,92}} \cdot \frac{1}{0,829} = 1,752 \quad (4.67)$$

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\kappa \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\kappa_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\kappa_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.68)$$

$$\frac{276,72}{\frac{0,526 \cdot 709,70}{1}} + 1,746 \cdot \frac{1,13}{\frac{1 \cdot 34,52}{1}} + 1,474 \cdot \frac{0,20}{\frac{1 \cdot 34,52}{1}} = 0,81 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.69)$$

$$\frac{276,72}{\frac{0,526 \cdot 709,70}{1}} + 1,470 \cdot \frac{1,13}{\frac{1 \cdot 34,52}{1}} + 1,752 \cdot \frac{0,20}{\frac{1 \cdot 34,52}{1}} = 0,80 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Vlivem ohybových momentů (působících společně se vzpěrem) se tedy sníží únosnost průřezu o 7 % ve směru y a 6 % ve směru z.

Porovnání výpočtu interakčních součinitelů podle metody 2 z přílohy B normy [4] získaných ze Scia Engineer 18.1

Tabulka 4.9 – Interakční součinitelé podle metody 2 získané ze Scia Engineer 18.1

Posudek ohybu a osového tlaku

Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.3 a rovnice (6.61), (6.62)

Parametry pro posudek ohybu a osového tlaku		
Interakční metoda	alternativní metoda 2	
Průřezová plocha A	3,0200e-03	m ²
Plastický modul průřezu W _{pl,y}	1,4690e-04	m ³
Plastický modul průřezu W _{pl,z}	1,4690e-04	m ³
Návrhová tlaková síla N _{Ed}	270,78	kN
Návrhový ohybový moment (maximum) M _{y,Ed}	0,92	kNm
Návrhový ohybový moment (maximum) M _{z,Ed}	0,20	kNm
Charakteristická tlaková únosnost N _{Rk}	709,70	kN
Charakteristická momentová únosnost M _{y,Rk}	34,52	kNm
Charakteristická momentová únosnost M _{z,Rk}	34,52	kNm
Redukční součinitel χ _y	0,53	
Redukční součinitel χ _z	0,53	
Redukční součinitel χ _{LT}	1,00	
Interakční součinitel k _{yy}	1,42	
Interakční součinitel k _{yz}	1,15	
Interakční součinitel k _{zy}	0,85	
Interakční součinitel k _{zz}	1,92	

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.68)$$

$$\frac{276,72}{\frac{0,526 \cdot 709,70}{1}} + 1,42 \cdot \frac{1,13}{\frac{1 \cdot 34,52}{1}} + 1,15 \cdot \frac{0,20}{\frac{1 \cdot 34,52}{1}} = 0,79 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.69)$$

$$\frac{276,72}{\frac{0,526 \cdot 709,70}{1}} + 0,85 \cdot \frac{1,13}{\frac{1 \cdot 34,52}{1}} + 1,92 \cdot \frac{0,20}{\frac{1 \cdot 34,52}{1}} = 0,78 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Výsledky obou metod se v tomto případě velmi mírně liší. Metoda 1 z přílohy A normy [4] udává výsledky o 1–3 % více na stranu bezpečnou, než metoda 2 z přílohy B normy [4].

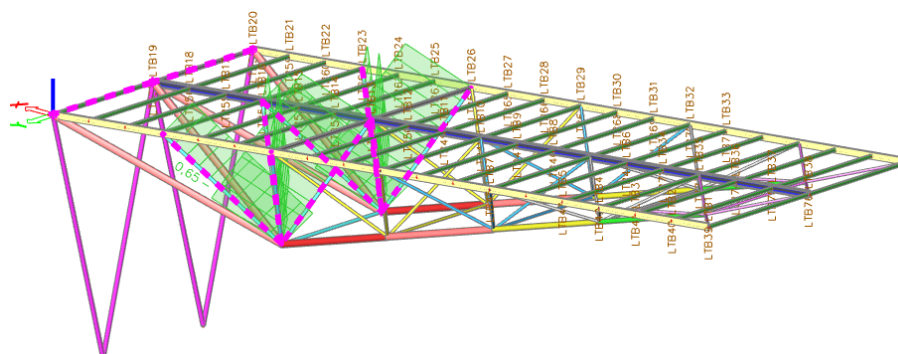
Porovnáním výpočtu diagonály (TR 159 x 6,3 mm) provedeným pomocí Scia Engineer 18.1 s ručně spočteným posudkem je možno konstatovat, že výsledky jsou shodné a fungování 3D modelu je správné. Posouzení ostatních diagonál je naprosto identické a ověření únosnosti je tudíž provedeno pouze pomocí automatického posudku z MKP modelu. Ruční výpočet by byl proveden pomocí vztahů 4.30 až 4.69. Níže zmíněné vnitřní síly a využití průřezů diagonál pocházejí z lineární obálky kombinací zatížení.

Diagonála

TR KR 76,1 x 6,3 mm

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

1,35 . vlastní tíha + 1,35 . stálé + 0,75 . sníh + 1,5 . vítr ve směru 1 (tlak)



Obrázek 4.25 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Posouzení na vzpěrný tlak

Návrhová hodnota normálové tlakové síly

$$N_{Ed} = 71,21 \text{ kN}$$

Využití průřezu je 58 % → vyhovuje

Posouzení na vzpěrný tlak spolu s ohybovými momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 0,20 \text{ kNm}$$

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,13 \text{ kNm}$$

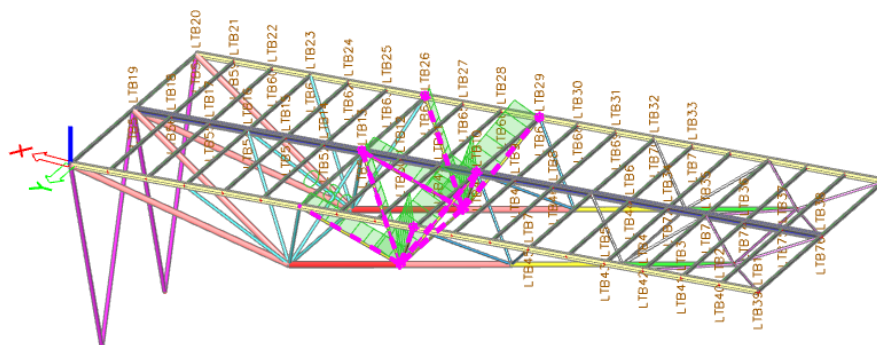
Využití průřezu je 65 % → vyhovuje

Diagonála

TR KR 63,5 x 6,3 mm

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

$$1,35 \cdot \text{vlastní tíha} + 1,35 \cdot \text{stálé} + 0,75 \cdot \text{sníh} + 1,5 \cdot \text{vítr ve směru 1 (tlak)}$$



Obrázek 4.26 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Posouzení na vzpěrný tlak

Návrhová hodnota normálové tlakové síly

$$N_{Ed} = 63,75 \text{ kN}$$

Využití průřezu je 72 % → vyhovuje

Posouzení na vzpěrný tlak spolu s ohybovými momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 0,16 \text{ kNm}$$

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,08 \text{ kNm}$$

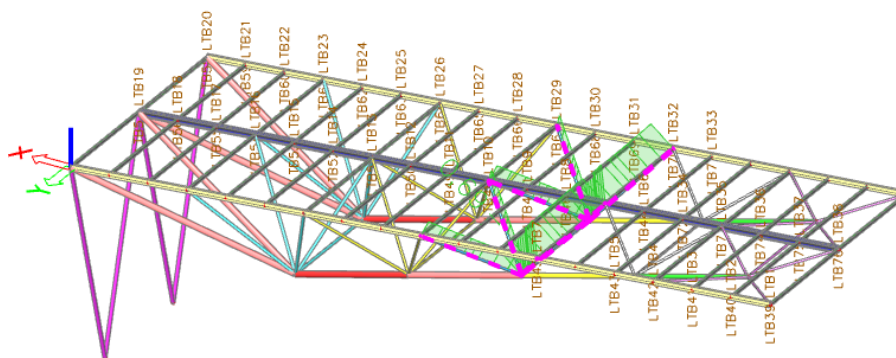
Využití průřezu je 80 % → vyhovuje

Diagonála

TR KR 60,3 x 6,3 mm

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

1,35 . vlastní tíha + 1,35 . stálé + 0,75 . sníh + 1,5 . vítr ve směru 1 (tlak)



Obrázek 4.27 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Posouzení na vzpěrný tlak

Návrhová hodnota normálové tlakové síly

$$N_{Ed} = 58,92 \text{ kN}$$

Využití průřezu je 63 % → vyhovuje

Posouzení na vzpěrný tlak spolu s ohybovými momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 0,15 \text{ kNm}$$

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,11 \text{ kNm}$$

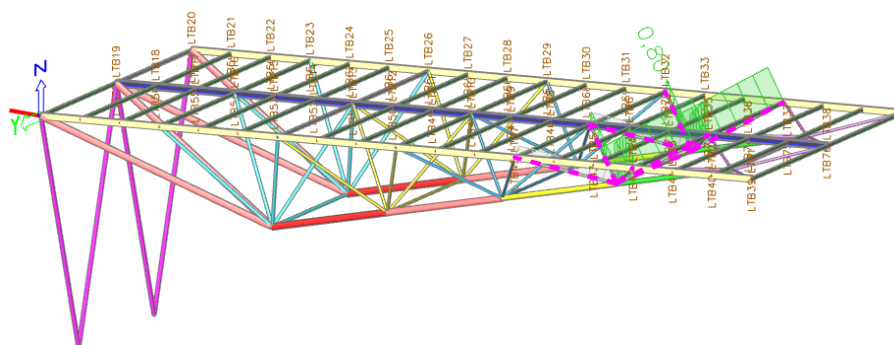
Využití průřezu je 69 % → vyhovuje

Diagonála

TR KR 57 x 6,3 mm

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

$$1,35 \cdot \text{vlastní tíha} + 1,35 \cdot \text{stálé} + 0,75 \cdot \text{sníh} + 1,5 \cdot \text{vítr ve směru 1 (tlak)}$$



Obrázek 4.28 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Posouzení na vzpěrný tlak

Návrhová hodnota normálové tlakové síly

$$N_{Ed} = 68,31 \text{ kN}$$

Využití průřezu je 74 % → vyhovuje

Posouzení na vzpěrný tlak spolu s ohybovými momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 0,14 \text{ kNm}$$

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,11 \text{ kNm}$$

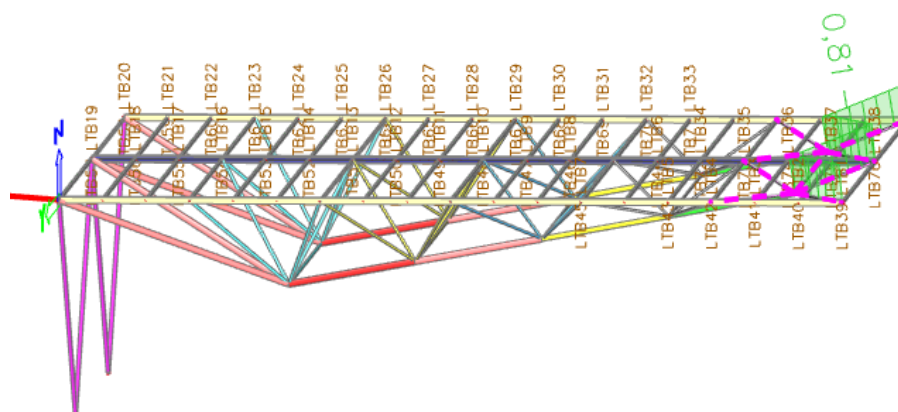
Využití průřezu je 80 % → vyhovuje

Diagonála

TR KR 54 x 6,3 mm

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

$$1,35 \cdot \text{vlastní tíha} + 1,35 \cdot \text{stálé} + 0,75 \cdot \text{sníh} + 1,5 \cdot \text{vítr ve směru 1 (tlak)}$$



Obrázek 4.29 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Posouzení na vzpěrný tlak

Návrhová hodnota normálové tlakové síly

$$N_{Ed} = 63,68 \text{ kN}$$

Využití průřezu je 75 % → vyhovuje

Posouzení na vzpěrný tlak spolu s ohybovými momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 0,14 \text{ kNm}$$

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,10 \text{ kNm}$$

Využití průřezu je 81 % → vyhovuje

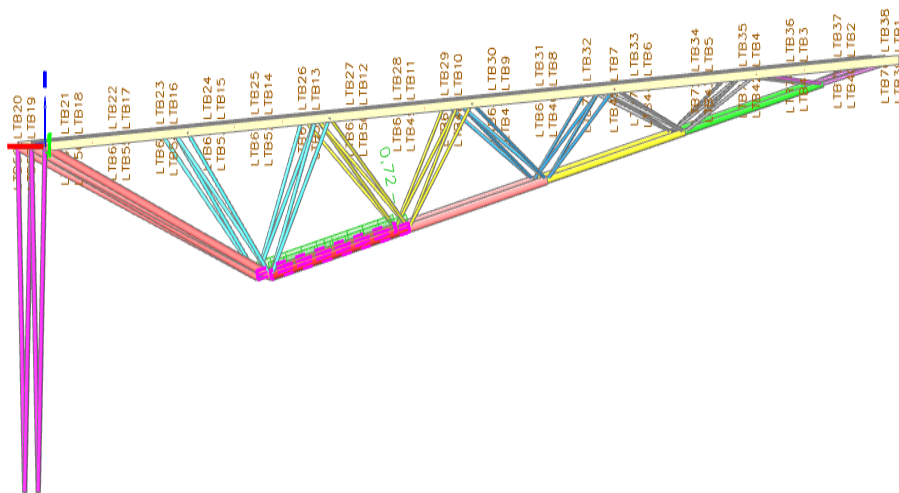
Dolní pás

TR KR 168,3 x 6,3 mm

Posudek pomocí Scia Engineer 18.1

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

$$1,35 \cdot \text{vlastní tíha} + 1,35 \cdot \text{stálé} + 0,75 \cdot \text{sníh} + 1,5 \cdot \text{vítr ve směru 1 (tlak)}$$



Obrázek 4.30 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Tabulka 4.10 – Posudek na vzpěr pomocí Scia Engineer 18.1

Posudek rovinného vzpěru
Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.1.1 a rovnice (6.46)

Parametry vzpěru	yy	zz	
Typ posuvných styčků	posuvné	neposuvné	
Systémová délka L	3,333	3,333	m
Součinitel vzpěru k	1,00	1,00	
Vzpěrná délka l_{cr}	3,333	3,333	m
Kritické Eulerovo zatížení N_{cr}	1964,22	1964,32	kN
Štíhlost λ	58,20	58,20	
Poměrná štíhlost λ_{rel}	0,62	0,62	
Mezní štíhlost $\lambda_{rel,0}$	0,20	0,20	
Vzpěr. křivka	a	a	
Imperfekce α	0,21	0,21	
Redukční součinitel χ	0,88	0,88	
Únosnost na vzpěr $N_{b,Rd}$	665,61	665,62	kN

Posudek rovinného vzpěru		
Průřezová plocha A	3,2100e-03	m ²
Únosnost na vzpěr $N_{b,Rd}$	665,61	kN
Jedn. posudek	0,70	-

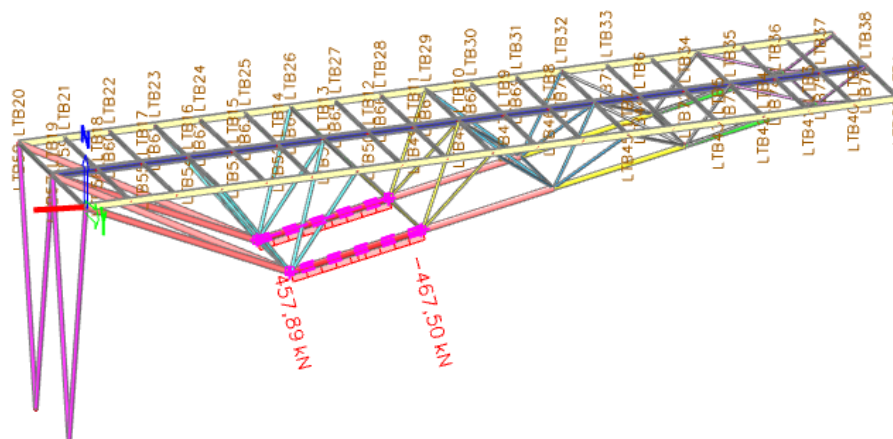
Tabulka 4.11 – Posudek na ohyb s osovým tlakem pomocí Scia Engineer 18.1

Posudek ohybu a osového tlaku
Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.3 a rovnice (6.61), (6.62)

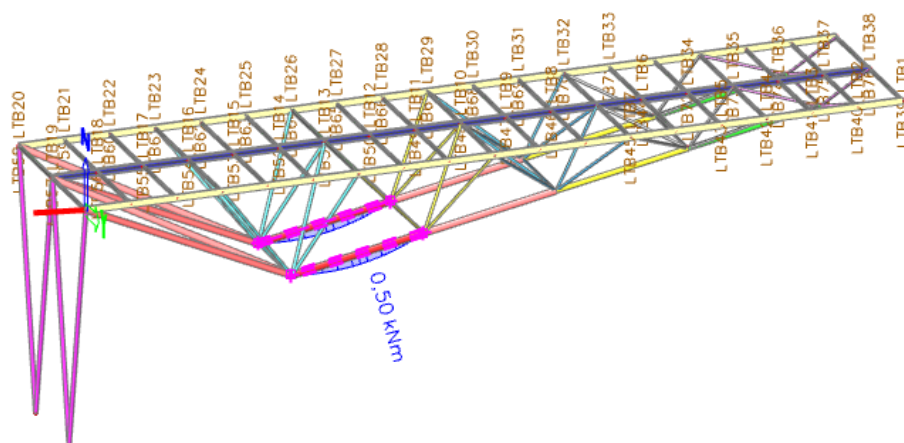
Parametry pro posudek ohybu a osového tlaku		
Interakční metoda	alternativní metoda 1	
Průřezová plocha A	3,2100e-03	m ²
Plastický modul průřezu $W_{pl,y}$	1,6534e-04	m ³
Návrhová tlaková síla N_{Ed}	467,50	kN
Návrhový ohybový moment (maximum) $M_{y,Ed}$	0,50	kNm
Návrhový ohybový moment (maximum) $M_{z,Ed}$	0,00	kNm
Charakteristická tlaková únosnost N_{Rk}	754,35	kN
Charakteristická momentová únosnost $M_{y,Rk}$	38,85	kNm
Redukční součinitel χ_y	0,88	
Redukční součinitele χ_z	0,88	
Redukční součinitele χ_{LT}	1,00	
Interakční součinitel k_{yy}	1,11	
Interakční součinitel k_{zy}	0,68	

Parametry interakční metody 1		
Kritické Eulerovo zatžení $N_{cr,y}$	1964,22	kN
Kritické Eulerovo zatžení $N_{cr,z}$	1964,32	kN
Pružné kritické zatžení $N_{cr,T}$	259269,23	kN
Plastický modul průřezu $W_{pl,y}$	1,6534e-04	m ³
Pružný modul průřezu $W_{el,y}$	1,2500e-04	m ³
Plastický modul průřezu $W_{pl,z}$	1,6534e-04	m ³
Pružný modul průřezu $W_{el,z}$	1,2500e-04	m ³
Moment setrvačnosti I_y	1,0530e-05	m ⁴
Moment setrvačnosti I_z	1,0530e-05	m ⁴
Moment setrvačnosti v prostém kroucení I_t	2,1060e-05	m ⁴
Metoda pro součinitel ekvivalentního momentu $C_{my,0}$	Tabulka A.2 řádek 4 (liniové zatžení)	
Součinitel ekvivalentního momentu $C_{my,0}$	1,01	
Součinitel μ_y	0,96	
Součinitel μ_z	0,96	
Součinitel ε_y	0,03	
Součinitel a_{LT}	0,00	
Kritický moment pro rovnoměrný ohyb $M_{cr,0}$	1827,88	kNm
Poměrná štíhlost $\lambda_{rel,0}$	0,15	
Limitní relativní štíhlost $\lambda_{rel,0,lim}$	0,20	
Součinitel ekvivalentního momentu C_{my}	1,01	
Součinitel ekvivalentního momentu C_{mLT}	1,00	
Součinitel b_{LT}	0,00	
Součinitel d_{LT}	0,00	
Součinitel w_y	1,32	
Součinitel w_z	1,32	
Součinitel η_{pl}	0,62	
Maximální relativní štíhlost $\lambda_{rel,max}$	0,62	
Součinitel C_{yy}	1,15	
Součinitel C_{zy}	1,13	
Posudek (6.61) = 0,70 + 0,01 + 0,00 = 0,72 -		
Posudek (6.62) = 0,70 + 0,01 + 0,00 = 0,71 -		
Prvek splňuje podmínky stabilního posudku.		

Ruční ověření výpočtu



Obrázek 4.31 – Vnitřní síly (normálové) na dolních pásech pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez



Obrázek 4.32 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru y) na dolních pásech pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez

Ve směru z tentokrát ohybové momenty nevznikají

Zatřídění průřezu

$$\frac{d}{t} = \frac{168,3}{6,3} = 26,714 \leq 50 \varepsilon^2 = 50 \cdot 1^2 = 50 \rightarrow \text{průřez třídy 1} \quad (4.30)$$

Průřezová plocha

$$A = 3,21 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Průřezový modul v elastické a plastické oblasti

$$W_{el} = 12,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$W_{pl} = 16,534 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Posouzení na vzpěrný tlak

Návrhová hodnota normálové tlakové síly

$$N_{Ed} = 467,50 \text{ kN}$$

Vzpěrná délka

$$L_{cr} = 3,333 \text{ m}$$

Moment setrvačnosti průřezu

$$I = 10,53 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Pružná kritická síla určená pro vlastnosti plného průřezu

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 10,53 \cdot 10^{-6}}{3,333^2} = 1964,61 \text{ kN} \quad (4.31)$$

Poměrná štíhlost prutu

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{3,21 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{1964,61 \cdot 10^3}} = 0,620 \quad (4.32)$$

Křivka vzpěrné pevnosti a (dutý, za tepla válcovaný průřez), součinitel imperfekce $\alpha = 0,21$.

Hodnota pro výpočet součinitele vzpěrnosti

$$\phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5[1 + 0,21(0,620 - 0,2) + 0,620^2] = 0,736 \quad (4.33)$$

Součinitel vzpěrnosti pro příslušný způsob vybočení

$$\kappa = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,736 + \sqrt{0,736^2 - 0,620^2}} = 0,883 \quad (4.34)$$

Návrhová vzpěrná únosnost tlačeního prutu

$$N_{b,Rd} = \frac{\kappa \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,883 \cdot 3,21 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 666,09 \text{ kN} \quad (4.35)$$

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{467,50}{666,09} = 0,70 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (4.36)$$

Posouzení na vzpěrný tlak spolu s ohybovými momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 0,50 \text{ kNm}$$

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,00 \text{ kNm}$$

Výpočet interakčních součinitelů podle metody 1 z přílohy A normy [4]

Kruhový průřez není náchylný na ztrátu příčné a torzní stability, proto lze uvážit následující:

Součinitel klopení $\chi_{LT} = 1$

Součinitel ekvivalentního konstantního momentu

$$C_{mLT} = 1$$

Součinitelé z [4] se rovná součiniteli ekvivalentního konstantního momentu

$$C_{my,0} = C_{my} \quad (4.37)$$

$$C_{mz,0} = C_{mz} \quad (4.38)$$

Charakteristická únosnost v prostém ohybu

$$M_{y,Rk} = M_{z,Rk} = W_{pl} \cdot f_y = 16,534 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3 = 38,85 \text{ kNm} \quad (4.39)$$

Plastická návrhová únosnost v prostém ohybu

$$M_{pl,y,Rd} = M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{16,534 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 38,85 \text{ kNm} \quad (4.40)$$

Charakteristická únosnost v prostém tlaku

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 3,21 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^3 = 754,35 \text{ kN} \quad (4.41)$$

Moment tuhosti v prostém kroucení

$$I_t = 21,06 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Součinitel dle [4]

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I} = 1 - \frac{21,06 \cdot 10^{-6}}{10,53 \cdot 10^{-6}} = 2 \quad (4.42)$$

Součinitelé dle [4]

$$w_y = w_z = \frac{W_{pl}}{W_{el}} = \frac{16,534 \cdot 10^{-5}}{12,5 \cdot 10^{-5}} = 1,32 \leq 1,5 \quad (4.43)$$

Součinitel dle [4]

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{RK}}{\gamma_{Mo}}} = \frac{467,50}{\frac{754,35}{1}} = 0,620 \quad (4.44)$$

Součinitelé dle [4]

$$\mu_z = \mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}}{1 - \chi \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} = \frac{1 - \frac{467,50}{1964,61}}{1 - 0,883 \cdot \frac{467,50}{1964,61}} = 0,965 \quad (4.45)$$

Součinitelé dle [4]

$$c_{mi,0} = c_{my,0} = c_{my} = c_{mz,0} = c_{mz} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} = 1 + 0,03 \frac{467,50}{1964,61} = 1,007 \quad (4.46)$$

Poměrná štíhlost

$$\bar{\lambda}_y = \bar{\lambda}_z = \bar{\lambda}_{max} = 0,620 \quad (4.47)$$

Výsečový moment setrvačnosti

$$I_w = 1,0471 \cdot 10^{-40} \text{ m}^6$$

Délka nosníku mezi body zajištěnými proti posunu kolmo z roviny

$$L = 3,333 \text{ m}$$

Součinitelé vzpěrné délky

$$k_w = k_z = 1,0 \quad (4.48)$$

Bezrozměrný parametr kroucení

$$\chi_{wt} = \frac{\pi}{k_w L} \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}} = \frac{\pi}{1,3,333} \sqrt{\frac{210 \cdot 1,0471 \cdot 10^{-40}}{81 \cdot 21,06 \cdot 10^{-6}}} = 3,384 \cdot 10^{-18} \quad (4.49)$$

Souřadnice působíště zatížení vzhledem k těžišti průřezu

$$z_a = 0 \text{ mm}$$

Souřadnice středu smyku vzhledem k těžišti průřezu

$$z_s = 0 \text{ mm}$$

Souřadnice působíště zatížení vzhledem ke středu smyku

$$z_g = z_a - z_s = 0 - 0 = 0 \text{ mm} \quad (4.50)$$

Bezrozměrný parametr působíště zatížení vzhledem ke středu smyku

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z \cdot L} \sqrt{\frac{EI}{GI_t}} = \frac{\pi \cdot 0}{1,0 \cdot 3,333} \sqrt{\frac{210 \cdot 10,53 \cdot 10^{-6}}{81 \cdot 21,06 \cdot 10^{-6}}} = 0 \quad (4.51)$$

Rozměr dle [4]

$$z_j = 0 \text{ pro průřezy symetrické dle osy } y - y$$

Bezrozměrný parametr nesymetrie průřezu

$$\zeta_j = \frac{\pi \cdot z_j}{k_z \cdot L} \sqrt{\frac{EI}{GI_t}} = \frac{\pi \cdot 0}{1,0 \cdot 3,333} \sqrt{\frac{210 \cdot 10,53 \cdot 10^{-6}}{81 \cdot 21,06 \cdot 10^{-6}}} = 0 \quad (4.52)$$

Součinitele závislé na zatížení a podmínkách uložení konců

$$C_1 = 1; C_2 = 1; C_3 = 1$$

Bezrozměrný kritický moment

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \kappa_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j)^2} - (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j) \right] = \quad (4.53)$$

$$\frac{1}{1} \left[\sqrt{1 + (3,384 \cdot 10^{-18})^2 + (1,0 - 1,0)^2} - (1,0 - 1,0) \right] = 1,000$$

Pružný kritický moment

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{EI GI_t}}{L} = 1 \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^6 \cdot 10,53 \cdot 10^{-6} \cdot 81 \cdot 10^6 \cdot 21,06 \cdot 10^{-6}}}{3,333} = \quad (4.54)$$

$$= 1830,67 \text{ kNm}$$

Poměrná štíhlost při klopení od konstantního ohybového momentu pro poměr koncových momentů $\Psi = 1$

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{M_{z,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{38,85}{1830,67}} = 0,146 \quad (4.55)$$

Součinitelé dle [4]

$$b_{LT} = 0,5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^2 \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = 0,5 \cdot 2 \cdot 0,146^2 \cdot \frac{0,50}{1,38,85} \cdot \frac{0,00}{38,85} = 0 \quad (4.56)$$

$$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{c_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} = 10 \cdot 2 \cdot \frac{0,146^2}{5 + 0,620^4} \cdot \frac{0,50}{1,007 \cdot 1 \cdot 38,85} = 1,058 \cdot 10^{-3} \quad (4.57)$$

$$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{c_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{c_{mz} \cdot M_{pl,z,Rd}} = 2 \cdot 2 \cdot \frac{0,146}{0,1 + 0,620^4} \cdot \frac{0,50}{1,007 \cdot 1 \cdot 38,85} \cdot \frac{0,00}{1,007 \cdot 38,85} = 0 \quad (4.58)$$

$$e_{LT} = 1,7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{c_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} = 1,7 \cdot 2 \cdot \frac{0,146}{0,1 + 0,620^4} \cdot \frac{0,50}{1,007 \cdot 1 \cdot 38,85} = 256,061 \cdot 10^{-4} \quad (4.59)$$

$$c_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} c_{my}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_y} c_{my}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] = 1 + (1,32 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,32} 1,007^2 \cdot 0,620 - \frac{1,6}{1,32} 1,007^2 \cdot 0,620^2 \right) 0,620 - 0 \right] = 1,152 \geq \frac{W_{el}}{W_{pl}} = \frac{12,5 \cdot 10^{-5}}{16,534 \cdot 10^{-5}} = 0,756 \rightarrow \text{dále uvažováno } 1,152 \quad (4.60)$$

$$c_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{c_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] = 1 + (1,32 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,007^2 \cdot 0,620^2}{1,32^5} \right) 0,620 - 1,058 \cdot 10^{-3} \right] = \quad (4.61)$$

$$= 1,126 \geq 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \cdot \frac{W_{el}}{W_{pl}} = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,32}{1,32}} \cdot \frac{12,5 \cdot 10^{-5}}{16,534 \cdot 10^{-5}} = 0,454 \rightarrow \text{dále uvažováno } 1,126$$

$$c_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{c_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] = \quad (4.62)$$

$$1 + (1,32 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,007^2 \cdot 0,620^2}{1,32^5} \right) 0,620 - 0 \right] =$$

$$= 1,127 \geq 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \cdot \frac{W_{el}}{W_{pl}} = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,32}{1,32}} \cdot \frac{12,5 \cdot 10^{-5}}{16,534 \cdot 10^{-5}} = 0,454 \rightarrow \text{dále uvažováno } 1,127$$

$$c_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} c_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_z} c_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - e_{LT} \right] = \quad (4.63)$$

$$= 1 + (1,32 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,32} 1,007^2 \cdot 0,62 - \frac{1,6}{1,32} 1,007^2 \cdot 0,62^2 \right) 0,62 - 256,061 \cdot 10^{-4} \right] =$$

$$= 1,144 \geq \frac{W_{el}}{W_{pl}} = \frac{12,5 \cdot 10^{-5}}{16,534 \cdot 10^{-5}} = 0,756 \rightarrow \text{dále uvažováno } 1,144$$

Interakční součinitelé

$$k_{yy} = c_{my} \cdot c_{mLT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \frac{1}{c_{yy}} = 1,013 \cdot 1 \cdot \frac{0,965}{1 - \frac{467,50}{1964,61}} \cdot \frac{1}{1,152} = 1,114 \quad (4.64)$$

$$k_{yz} = c_{mz} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \frac{1}{c_{yz}} 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} = 1,013 \cdot \frac{0,965}{1 - \frac{467,50}{1964,61}} \cdot \frac{1}{1,126} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,32}{1,32}} = 0,684 \quad (4.65)$$

$$k_{zy} = c_{my} \cdot c_{mLT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \frac{1}{c_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} = 1,013 \cdot 1 \cdot \frac{0,965}{1 - \frac{467,50}{1964,61}} \cdot \frac{1}{1,127} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,32}{1,32}} = \quad (4.66)$$

$$= 0,683$$

$$k_{zz} = c_{mz} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \frac{1}{c_{zz}} = 1,013 \cdot \frac{0,965}{1 - \frac{467,50}{1964,61}} \cdot \frac{1}{1,144} = 1,121 \quad (4.67)$$

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\kappa \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\kappa_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\kappa_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.68)$$

$$\frac{467,50}{\frac{0,883 \cdot 754,35}{1}} + 1,114 \cdot \frac{0,50}{\frac{1 \cdot 38,85}{1}} + 0,684 \cdot \frac{0,00}{\frac{1 \cdot 38,85}{1}} = 0,72 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\kappa \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\kappa_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\kappa_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.69)$$

$$\frac{467,50}{\frac{0,883 \cdot 754,35}{1}} + 0,683 \cdot \frac{0,50}{\frac{1 \cdot 38,85}{1}} + 1,121 \cdot \frac{0,00}{\frac{1 \cdot 38,85}{1}} = 0,71 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Vlivem ohybových momentů (působících společně se vzpěrem) se tedy sníží únosnost průřezu pouze o 1–2 %, jejich vliv je téměř zanedbatelný.

Porovnání výpočtu interakčních součinitelů podle metody 2 z přílohy B normy [4] získaných ze Scia Engineer 18.1.

Tabulka 4.12 – Interakční součinitelé podle metody 2 získané ze Scia Engineer 18.1

Posudek ohybu a osového tlaku

Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.3 a rovnice (6.61), (6.62)

Parametry pro posudek ohybu a osového tlaku		
Interakční metoda	alternativní metoda 2	
Průřezová plocha A	3,2100e-03	m ²
Plastický modul průřezu W _{pl,y}	1,6534e-04	m ³
Návrhová tlaková síla N _{Ed}	457,62	kN
Návrhový ohybový moment (maximum) M _{y,Ed}	0,44	kNm
Návrhový ohybový moment (maximum) M _{z,Ed}	0,00	kNm
Charakteristická tlaková únosnost N _{Rk}	754,35	kN
Charakteristická momentová únosnost M _{y,Rk}	38,85	kNm
Redukční součinitel χ _y	0,88	
Redukční součinitel χ _z	0,88	
Redukční součinitel χ _{LT}	1,00	
Interakční součinitel k _{yy}	1,16	
Interakční součinitel k _{yz}	0,70	

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\kappa \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\kappa_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\kappa_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.68)$$

$$\frac{467,50}{\frac{0,883 \cdot 754,35}{1}} + 1,16 \cdot \frac{0,50}{\frac{1 \cdot 38,85}{1}} + 0,7 \cdot \frac{0,13}{\frac{1 \cdot 38,85}{1}} = 0,72 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Výsledky obou metod jsou stejné.

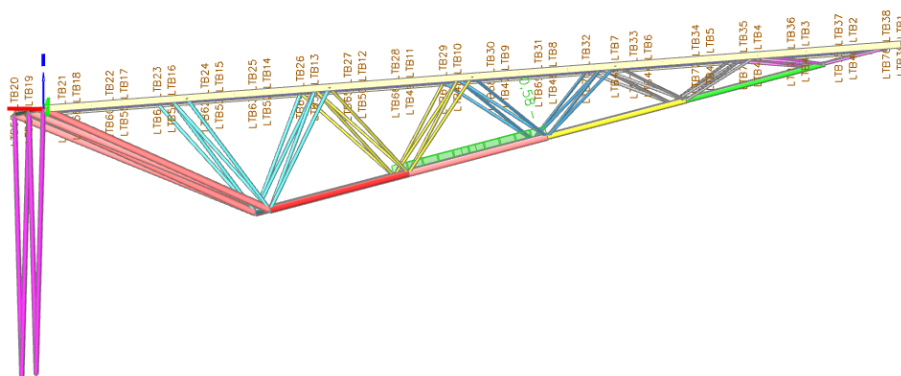
Obdobně jako u jiných prutů, i u posouzení jednoho prutu dolního pásu příhradové konstrukce (TR 168,3 x 6,3 mm), lze říci, že posudek provedený pomocí Scia Engineer 18.1 a ručně spočtený vykazují stejné výsledky. Toto porovnání slouží jako kontrola, která potvrdila správnost fungování 3D modelu. Posouzení všech ostatních prvků dolního pásu je opět stejné, proto je posudek proveden pouze pomocí softwaru. Ruční výpočet by bylo možné provést dle vztahů 4.30 až 4.69. Níže zmíněné vnitřní síly a využití průřezů diagonál pocházejí z kombinace vyvolávající největší využití průřezu.

Dolní pás

TR KR 159 x 6,3 mm

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

1,35 · vlastní tíha + 1,35 · stálé + 0,75 · sníh + 1,5 · vítr ve směru 1 (tlak)



Obrázek 4.33 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Posouzení na vzpěrný tlak

Návrhová hodnota normálové tlakové síly

$$N_{Ed} = 223,51 \text{ kN}$$

Využití průřezu je 51 % → vyhovuje

Posouzení na vzpěrný tlak spolu s ohybovými momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 0,37 \text{ kNm}$$

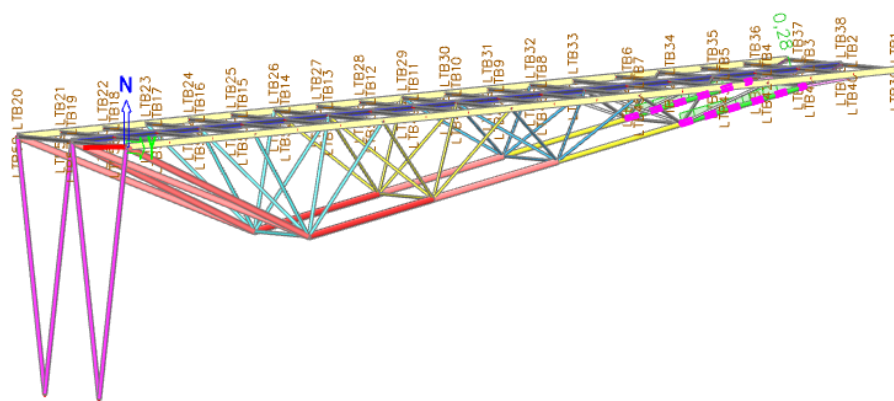
Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,00 \text{ kNm}$$

Využití průřezu je 55 % → vyhovuje

Dolní pás

TR KR 114,3 x 6,3 mm



Obrázek 4.35 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Posouzení na vzpěrný tlak

Návrhová hodnota normálové tlakové síly

$$N_{Ed} = 91,13 \text{ kN}$$

Využití průřezu je 25 % → vyhovuje

Posouzení na vzpěrný tlak spolu s ohybovými momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 0,34 \text{ kNm}$$

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,00 \text{ kNm}$$

Využití průřezu je 28 % → vyhovuje

Pruty mezi dolními pásy

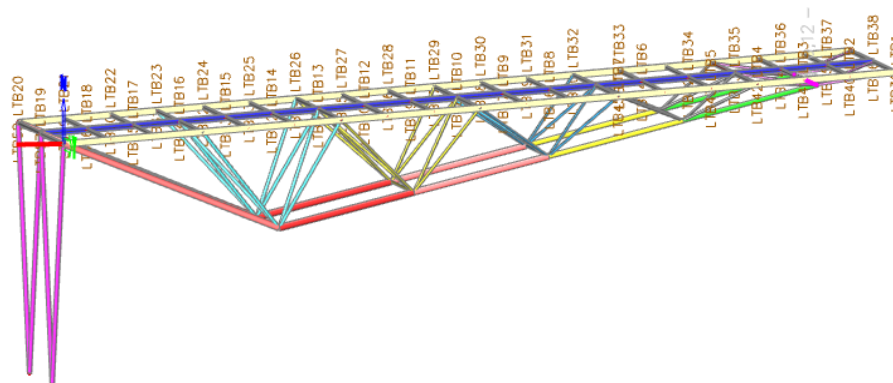
TR KR 54 x 6,3 mm

Tyto prvky jsou namáhány pouze minimálně a využití únosnosti průřezu je velmi malé. Vnitřní síly, které zde vznikají, jsou pouze od vlastní tíhy a větru přenášeného samotnými pruty příhradové konstrukce. Pruty však se statického hlediska plní významnou funkci při ztužení celé konstrukce. Dalším důvodem jejich přítomnosti je montážní proces. V tomto případě pomáhají přesně vymezit prostor mezi dolními pásy a montáž se stává snazší. Dimenze jednotlivých prvků je shodná s dimenzemi diagonál sbíhajících se do stejného styčnicku, ze kterého spojovací prut vychází. Důvod řešení je především architektonický.

Posudek pomocí Scia Engineer 18.1

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

$1,35 \cdot \text{vlastní tíha} + 1,35 \cdot \text{stálé} + 0,75 \cdot \text{sníh} + 1,5 \cdot \text{vítr ve směru 1 (sání)}$



Obrázek 4.36 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Tabulka 4.13 – Posudek na vzpěr pomocí Scia Engineer 18.1

Posudek rovinného vzpěru

Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.1.1 a rovnice (6.46)

Parametry vzpěru	yy	zz	
Typ posuvných styčníků	posuvné	neposuvné	
Systémová délka L	3,333	3,333	m
Součinitel vzpěru k	1,00	1,00	
Vzpěrná délka l_{cr}	3,333	3,333	m
Kritické Eulerovo zatížení N_{cr}	50,92	50,93	kN
Štíhlost λ	196,01	196,01	
Poměrná štíhlost λ_{rel}	2,09	2,09	
Mezní štíhlost $\lambda_{rel,0}$	0,20	0,20	
Vzpěr. křivka	a	a	
Imperfekce α	0,21	0,21	
Redukční součinitel χ	0,21	0,21	
Únosnost na vzpěr $N_{b,Rd}$	45,69	45,69	kN

Posudek rovinného vzpěru		
Průřezová plocha A	9,4400e-04	m²
Únosnost na vzpěr $N_{b,Rd}$	45,69	kN
Jedn. posudek	0,06	-

Tabulka 4.14 – Posudek na ohyb s osovým tlakem pomocí Scia Engineer 18.1

Posudek ohybu a osového tlaku

Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.3 a rovnice (6.61), (6.62)

Parametry pro posudek ohybu a osového tlaku		
Interakční metoda	alternativní metoda 1	
Průřezová plocha A	9,4400e-04	m²
Plastický modul průřezu $W_{pl,y}$	1,4334e-05	m³
Plastický modul průřezu $W_{pl,z}$	1,4334e-05	m³
Návrhová tlaková síla N_{Ed}	2,75	kN
Návrhový ohybový moment (maximum) $M_{y,Ed}$	0,14	kNm
Návrhový ohybový moment (maximum) $M_{z,Ed}$	-0,10	kNm
Charakteristická tlaková únosnost N_{Rk}	221,84	kN
Charakteristická momentová únosnost $M_{y,Rk}$	3,37	kNm
Charakteristická momentová únosnost $M_{z,Rk}$	3,37	kNm
Redukční součinitel χ_y	0,21	
Redukční součinitel χ_z	0,21	
Redukční součinitel χ_{LT}	1,00	
Interakční součinitel k_{yy}	1,04	
Interakční součinitel k_{yz}	0,64	
Interakční součinitel k_{zy}	0,64	
Interakční součinitel k_{zz}	1,04	

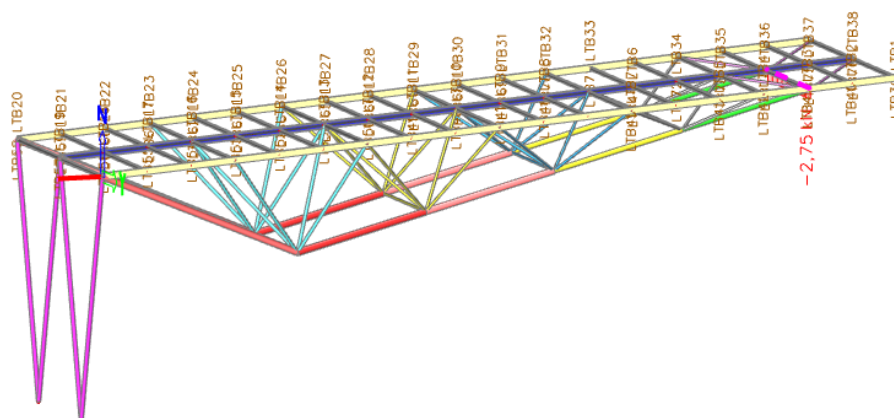
Parametry interakční metody 1		
Kritické Eulerovo zatížení $N_{cr,y}$	50,92	kN
Kritické Eulerovo zatížení $N_{cr,z}$	50,93	kN
Pružné kritické zatížení $N_{cr,T}$	76246,15	kN
Plastický modul průřezu $W_{pl,y}$	1,4334e-05	m ³
Pružný modul průřezu $W_{el,y}$	1,0100e-05	m ³
Plastický modul průřezu $W_{pl,z}$	1,4334e-05	m ³
Pružný modul průřezu $W_{el,z}$	1,0100e-05	m ³
Moment setrvačnosti I_y	2,7300e-07	m ⁴
Moment setrvačnosti I_z	2,7300e-07	m ⁴
Moment setrvačnosti v prostém kroucení I_t	5,4600e-07	m ⁴
Metoda pro součinitel ekvivalentního momentu	Tabulka A.2 řádek 4 (liniové zatížení)	
Parametry interakční metody 1		
$C_{my,0}$		
Součinitel ekvivalentního momentu $C_{my,0}$	1,00	
Metoda pro součinitel ekvivalentního momentu	Tabulka A.2 řádek 4 (liniové zatížení)	
$C_{mz,0}$		
Součinitel ekvivalentního momentu $C_{mz,0}$	1,00	
Součinitel μ_y	0,96	
Součinitel μ_z	0,96	
Součinitel ε_y	4,64	
Součinitel a_{LT}	0,00	
Kritický moment pro rovnoměrný ohyb $M_{cr,0}$	47,39	kNm
Poměrná štíhlost $\lambda_{rel,0}$	0,27	
Limitní relativní štíhlost $\lambda_{rel,0,lim}$	0,21	
Součinitel ekvivalentního momentu C_{my}	1,00	
Součinitel ekvivalentního momentu C_{mz}	1,00	
Součinitel ekvivalentního momentu C_{mLT}	1,00	
Součinitel b_{LT}	0,00	
Součinitel c_{LT}	0,00	
Součinitel d_{LT}	0,00	
Součinitel e_{LT}	0,00	
Součinitel w_y	1,42	
Součinitel w_z	1,42	
Součinitel n_{pl}	0,01	
Maximální relativní štíhlost $\lambda_{rel,max}$	2,09	
Součinitel C_{yy}	0,97	
Součinitel C_{yz}	0,96	
Součinitel C_{zy}	0,96	
Součinitel C_{zz}	0,97	

Posudek (6.61) = $0,06 + 0,04 + 0,02 = 0,12$ -

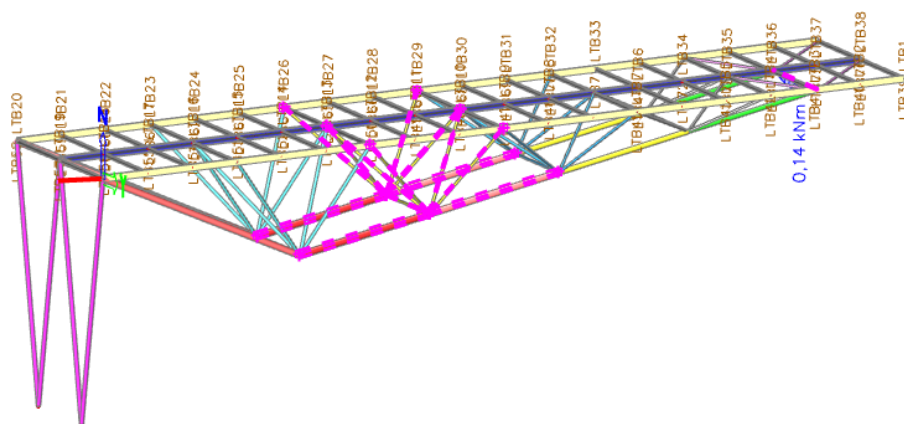
Posudek (6.62) = $0,06 + 0,03 + 0,03 = 0,12$ -

Prvek splňuje podmínky stabilního posudku.

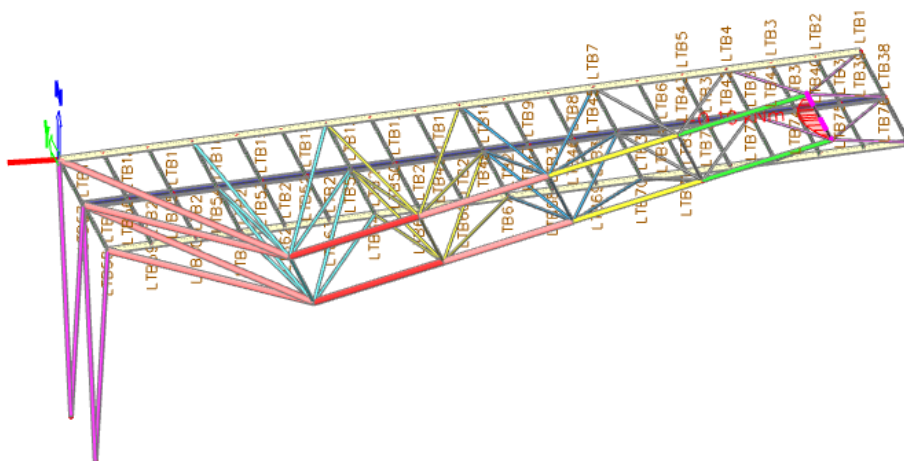
Ruční ověření výpočtu



Obrázek 4.37 – Vnitřní síly (normálové) na prutu spojující dolní pásy pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez



Obrázek 4.38– Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru y) na prutu spojující dolní pásy pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez



Obrázek 4.39 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru z) na prutu spojující dolní pásy pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez

Zatřídění průřezu

$$\frac{d}{t} = \frac{54}{6,3} = 8,571 \leq 50 \varepsilon^2 = 50 \cdot 1^2 = 50 \rightarrow \text{průřez třídy 1} \quad (4.30)$$

Průřezová plocha

$$A = 9,44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Průřezový modul v elastické a plastické oblasti

$$W_{el} = 1,01 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$W_{pl} = 1,4334 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Posouzení na vzpěrný tlak

Návrhová hodnota normálové tlakové síly

$$N_{Ed} = 2,75 \text{ kN}$$

Vzpěrná délka

$$L_{cr} = 3,333 \text{ m}$$

Moment setrvačnosti průřezu

$$I = 2,73 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

Pružná kritická síla určená pro vlastnosti plného průřezu

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 2,73 \cdot 10^{-7}}{3,333^2} = 50,93 \text{ kN} \quad (4.31)$$

Poměrná štíhlost prutu

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{9,44 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^6}{50,93 \cdot 10^3}} = 2,087 \quad (4.32)$$

Křivka vzpěrné pevnosti a (dutý, za tepla válcovaný průřez), součinitel imperfekce $\alpha = 0,21$.

Hodnota pro výpočet součinitele vzpěrnosti

$$\phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5[1 + 0,21(2,087 - 0,2) + 2,087^2] = 2,876 \quad (4.33)$$

Součinitel vzpěrnosti pro příslušný způsob vybočení

$$\kappa = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{2,876 + \sqrt{2,876^2 - 2,087^2}} = 0,206 \quad (4.34)$$

Návrhová vzpěrná únosnost tlačенého prutu

$$N_{b,Rd} = \frac{\kappa \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,206 \cdot 9,44 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 45,69 \text{ kN} \quad (4.35)$$

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{2,75}{45,69} = 0,06 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (4.36)$$

Posouzení na vzpěrný tlak spolu s ohybovými momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 0,14 \text{ kNm}$$

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,10 \text{ kNm}$$

Výpočet interakčních součinitelů podle metody 1 z přílohy A normy [4]

Kruhový průřez není náchylný na ztrátu příčné a torzní stability, proto lze uvážit následující:

Součinitel klopení

$$\chi_{LT} = 1$$

Součinitel ekvivalentního konstantního momentu

$$C_{mLT} = 1$$

Součinitelé z [4] se rovná součiniteli ekvivalentního konstantního momentu

$$C_{my,0} = C_{my} \quad (4.37)$$

$$C_{mz,0} = C_{mz} \quad (4.38)$$

Charakteristická únosnost v prostém ohybu

$$M_{y,Rk} = M_{z,Rk} = W_{pl} \cdot f_y = 1,4334 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3 = 3,37 \text{ kNm} \quad (4.39)$$

Plastická návrhová únosnost v prostém ohybu

$$M_{pl,y,Rd} = M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{1,4334 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 3,37 \text{ kNm} \quad (4.40)$$

Charakteristická únosnost v prostém tlaku

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 9,44 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3 = 221,84 \text{ kN} \quad (4.41)$$

Moment tuhosti v prostém kroucení

$$I_t = 5,46 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

Součinitel dle [4]

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I} = 1 - \frac{5,46 \cdot 10^{-7}}{2,73 \cdot 10^{-7}} = 2 \quad (4.42)$$

Součinitelé dle [4]

$$w_y = w_z = \frac{W_{pl}}{W_{el}} = \frac{1,4334 \cdot 10^{-5}}{1,01 \cdot 10^{-5}} = 1,42 \leq 1,5 \quad (4.43)$$

Součinitel dle [4]

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rk}}{\gamma_{M0}}} = \frac{2,75}{\frac{221,84}{1}} = 0,012 \quad (4.44)$$

Součinitel dle [4]

$$\mu_z = \mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}}{1 - \kappa \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} = \frac{1 - \frac{2,75}{50,93}}{1 - 0,206 \cdot \frac{2,75}{50,93}} = 0,957 \quad (4.45)$$

Součinitelé dle [4]

$$c_{mi,0} = c_{my,0} = c_{my} = c_{mz,0} = c_{mz} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} = 1 + 0,03 \frac{2,75}{50,93} = 1,002 \quad (4.46)$$

Poměrná štíhlost

$$\bar{\lambda}_y = \bar{\lambda}_z = \bar{\lambda}_{max} = 2,087 \quad (4.47)$$

Výsečový moment setrvačnosti

$$I_w = 3,4328 \cdot 10^{-43} \text{ m}^6$$

Délka nosníku mezi body zajištěnými proti posunu kolmo z roviny

$$L = 3,333 \text{ m}$$

Součinitelé vzpěrné délky

$$k_w = k_z = 1,0 \quad (4.48)$$

Bezrozměrný parametr kroucení

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w L} \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}} = \frac{\pi}{1,3,333} \sqrt{\frac{210 \cdot 3,4328 \cdot 10^{-43}}{81 \cdot 5,46 \cdot 10^{-7}}} = 1,203 \cdot 10^{-18} \quad (4.49)$$

Souřadnice působíště zatížení vzhledem k těžišti průřezu

$$z_a = 0 \text{ mm}$$

Souřadnice středu smyku vzhledem k těžišti průřezu

$$z_s = 0 \text{ mm}$$

Souřadnice působíště zatížení vzhledem ke středu smyku

$$z_g = z_a - z_s = 0 - 0 = 0 \text{ mm} \quad (4.50)$$

Bezrozměrný parametr působíště zatížení vzhledem ke středu smyku

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z \cdot L} \sqrt{\frac{EI}{GI_t}} = \frac{\pi \cdot 0}{1,0 \cdot 3,333} \sqrt{\frac{210 \cdot 2,73 \cdot 10^{-7}}{81 \cdot 5,46 \cdot 10^{-7}}} = 0 \quad (4.51)$$

Rozměr dle [4]

$$z_j = 0 \text{ pro průřezy symetrické dle osy } y - y$$

Bezrozměrný parametr nesymetrie průřezu

$$\zeta_j = \frac{\pi \cdot z_j}{k_z \cdot L} \sqrt{\frac{EI}{GI_t}} = \frac{\pi \cdot 0}{1,0 \cdot 3,333} \sqrt{\frac{210 \cdot 2,73 \cdot 10^{-7}}{81 \cdot 5,46 \cdot 10^{-7}}} = 0 \quad (4.52)$$

Součinitelé závisící na zatížení a podmínkách uložení konců

$$C_1 = 1; C_2 = 1; C_3 = 1$$

Bezrozměrný kritický moment

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \kappa_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j)^2} - (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j) \right] = \quad (4.53)$$

$$\frac{1}{1} \left[\sqrt{1 + (1,203 \cdot 10^{-18})^2 + (1,0 - 1,0)^2} - (1,0 - 1,0) \right] = 1,000$$

Pružný kritický moment

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{EI G I_t}}{L} = 1 \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^6 \cdot 2,73 \cdot 10^{-7} \cdot 81 \cdot 10^6 \cdot 5,46 \cdot 10^{-7}}}{3,333} = \quad (4.54)$$

47,46 kNm

Poměrná štíhlost při klopení od konstantního ohybového momentu pro poměr koncových momentů $\Psi = 1$

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{M_{z,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{3,37}{47,46}} = 0,266 \quad (4.55)$$

Součinitelé dle [4]

$$b_{LT} = 0,5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^2 \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = 0,5 \cdot 2 \cdot 0,266^2 \cdot \frac{0,14}{1,3,37} \cdot \frac{0,10}{3,37} = \quad (4.56)$$

$$= 8,722 \cdot 10^{-5}$$

$$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{c_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} = 10 \cdot 2 \cdot \frac{0,266^2}{5 + 2,087^4} \cdot \frac{0,14}{1,002 \cdot 1 \cdot 3,37} = \quad (4.57)$$

$$= 2,448 \cdot 10^{-3}$$

$$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{c_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{c_{mz} \cdot M_{pl,z,Rd}} = \quad (4.58)$$

$$= 2 \cdot 2 \cdot \frac{0,266}{0,1 + 2,087^4} \cdot \frac{0,14}{1,002 \cdot 1 \cdot 3,37} \cdot \frac{0,10}{1,002 \cdot 3,37} = 6,850 \cdot 10^{-5}$$

$$e_{LT} = 1,7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{c_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} = \quad (4.59)$$

$$= 1,7 \cdot 2 \cdot \frac{0,266}{0,1 + 2,087^4} \cdot \frac{0,14}{1,002 \cdot 1 \cdot 3,37} = 1,966 \cdot 10^{-3}$$

$$c_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} c_{my}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_y} c_{my}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] = \quad (4.60)$$

$$1 + (1,42 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,42} 1,002^2 \cdot 2,087 - \frac{1,6}{1,42} 1,002^2 \cdot 2,087^2 \right) 0,012 - 8,722 \cdot 10^{-5} \right] =$$

$$= 0,973 \geq \frac{W_{el}}{W_{pl}} = \frac{1,01 \cdot 10^{-5}}{1,4334 \cdot 10^{-5}} = 0,705 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,973$$

$$c_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{c_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] = \quad (4.61)$$

$$1 + (1,42 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,002^2 \cdot 2,087^2}{1,42^5} \right) 0,012 - 2,448 \cdot 10^{-3} \right] =$$

$$= 0,956 \geq 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \cdot \frac{W_{el}}{W_{pl}} = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,42}{1,42}} \cdot \frac{1,01 \cdot 10^{-5}}{1,4334 \cdot 10^{-5}} = 0,423 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,956$$

$$c_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{c_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] = \quad (4.62)$$

$$1 + (1,42 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,002^2 \cdot 2,087^2}{1,42^5} \right) 0,012 - 6,850 \cdot 10^{-5} \right] =$$

$$= 0,957 \geq 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \cdot \frac{W_{el}}{W_{pl}} = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,42}{1,42}} \cdot \frac{1,01 \cdot 10^{-5}}{1,4334 \cdot 10^{-5}} = 0,423 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,957$$

$$c_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} c_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_z} c_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - e_{LT} \right] = \quad (4.63)$$

$$= 1 + (1,42 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,42} 1,002^2 \cdot 2,087 - \frac{1,6}{1,42} 1,002^2 \cdot 2,087^2 \right) 0,012 - 1,966 \cdot 10^{-3} \right] =$$

$$= 0,972 \geq \frac{W_{el}}{W_{pl}} = \frac{1,01 \cdot 10^{-5}}{1,4334 \cdot 10^{-5}} = 0,705 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,972$$

Interakční součinitelé

$$k_{yy} = c_{my} \cdot c_{mLT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \cdot \frac{1}{c_{yy}} = 1,002 \cdot 1 \cdot \frac{0,957}{1 - \frac{2,75}{50,93}} \cdot \frac{1}{0,973} = 1,036 \quad (4.64)$$

$$k_{yz} = c_{mz} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \frac{1}{c_{yz}} 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} = 1,002 \cdot \frac{0,957}{1 - \frac{2,75}{50,93}} \cdot \frac{1}{0,956} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,42}{1,42}} = 0,636 \quad (4.65)$$

$$k_{zy} = c_{my} \cdot c_{mLT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \frac{1}{c_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} = 1,002 \cdot 1 \cdot \frac{0,957}{1 - \frac{2,75}{50,93}} \cdot \frac{1}{0,957} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,42}{1,42}} = \quad (4.66)$$

$$= 0,636$$

$$k_{zz} = c_{mz} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \frac{1}{c_{zz}} = 1,002 \cdot \frac{0,957}{1 - \frac{2,75}{50,93}} \cdot \frac{1}{0,972} = 1,043 \quad (4.67)$$

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\kappa \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\kappa_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\kappa_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.68)$$

$$\frac{2,75}{\frac{0,206 \cdot 221,84}{1}} + 1,036 \cdot \frac{0,14}{\frac{1 \cdot 3,37}{1}} + 0,636 \cdot \frac{0,10}{\frac{1 \cdot 3,37}{1}} = 0,12 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\kappa \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\kappa_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\kappa_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.69)$$

$$\frac{2,75}{\frac{0,206 \cdot 221,84}{1}} + 0,636 \cdot \frac{0,14}{\frac{1 \cdot 3,37}{1}} + 1,043 \cdot \frac{0,10}{\frac{1 \cdot 3,37}{1}} = 0,12 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Vlivem ohybových momentů (působících společně se vzpěrem) se sníží únosnost průřezu o 6 %.

Porovnání výpočtu interakčních součinitelů podle metody 2 z přílohy B normy [4] získaných ze Scia Engineer 18.1.

Tabulka 4.15 – Interakční součinitelé podle metody 2 získané ze Scia Engineer 18.1

Posudek ohybu a osového tlaku
Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.3 a rovnice (6.61), (6.62)

Parametry pro posudek ohybu a osového tlaku		
Interakční metoda	alternativní metoda 2	
Průřezová plocha A	9,4400e-04	m ²
Plastický modul průřezu W _{pl,y}	1,4334e-05	m ³
Plastický modul průřezu W _{pl,z}	1,4334e-05	m ³
Návrhová tlaková síla N _{Ed}	2,81	kN
Návrhový ohybový moment (maximum) M _{y,Ed}	0,12	kNm
Návrhový ohybový moment (maximum) M _{z,Ed}	-0,10	kNm
Charakteristická tlaková únosnost N _{Rk}	221,84	kN
Charakteristická momentová únosnost M _{y,Rk}	3,37	kNm
Charakteristická momentová únosnost M _{z,Rk}	3,37	kNm
Redukční součinitel χ _y	0,21	
Redukční součinitel χ _z	0,21	
Redukční součinitel χ _{LT}	1,00	
Interakční součinitel k _{yy}	0,94	
Interakční součinitel k _{yz}	0,62	
Interakční součinitel k _{zy}	0,57	
Interakční součinitel k _{zz}	1,03	

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.68)$$

$$\frac{2,75}{\frac{0,206 \cdot 221,84}{1}} + 0,94 \cdot \frac{0,14}{\frac{1 \cdot 3,37}{1}} + 0,62 \cdot \frac{0,10}{\frac{1 \cdot 3,37}{1}} = 0,12 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.69)$$

$$\frac{2,75}{\frac{0,206 \cdot 221,84}{1}} + 0,57 \cdot \frac{0,14}{\frac{1 \cdot 3,37}{1}} + 1,03 \cdot \frac{0,10}{\frac{1 \cdot 3,37}{1}} = 0,11 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

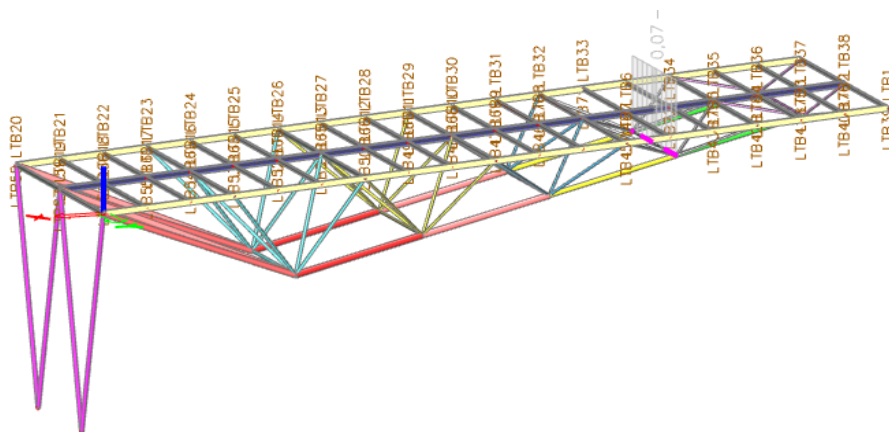
Výsledky obou metod pro získání interakčních součinitelů jsou i tentokrát stejné. Celkové využití únosnosti průřezu je velmi malé. Ruční výpočet prutů mezi dolními pásy (TR 54 x 6,3 mm) opět zároveň slouží jako kontrola 3D modelu. Posouzení ostatních prutů mezi dolními pásy je provedeno pouze pomocí automatického posudku ze Scia Engineer 18.1. Ruční výpočet by bylo možné provést dle vztahů 4.30 až 4.69.

Pruty mezi dolními pásy

TR KR 57 x 6,3 mm

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

$1,35 \cdot \text{vlastní tíha} + 1,35 \cdot \text{stálé} + 0,75 \cdot \text{sníh} + 1,5 \cdot \text{vítr ve směru 1 (tlak)}$



Obrázek 4.40 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Posouzení na vzpěrný tlak

Návrhová hodnota normálové tlakové síly

$$N_{Ed} = 2,43 \text{ kN}$$

Využití průřezu je 1 % → vyhovuje

Posouzení na vzpěrný tlak spolu s ohybovými momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 0,14 \text{ kNm}$$

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,11 \text{ kNm}$$

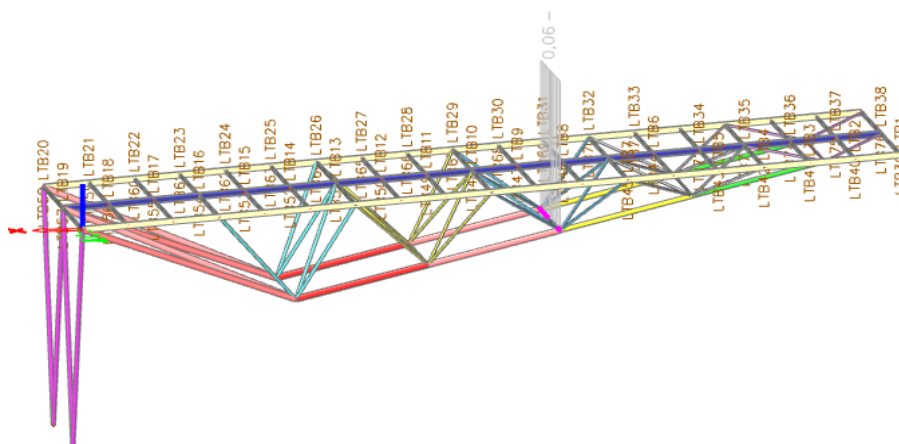
Využití průřezu je 5 % → vyhovuje

Pruty mezi dolními pásy

TR KR 60,3 x 6,3 mm

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

$1,35 \cdot \text{vlastní tíha} + 1,35 \cdot \text{stálé} + 0,75 \cdot \text{sníh} + 1,5 \cdot \text{vítr ve směru 1 (tlak)}$



Obrázek 4.41– Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Posouzení na vzpěrný tlak

Návrhová hodnota normálové tlakové síly

$$N_{Ed} = 0,72 \text{ kN}$$

Využití průřezu je méně než 1 % → vyhovuje

Posouzení na vzpěrný tlak spolu s ohybovými momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 0,15 \text{ kNm}$$

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,11 \text{ kNm}$$

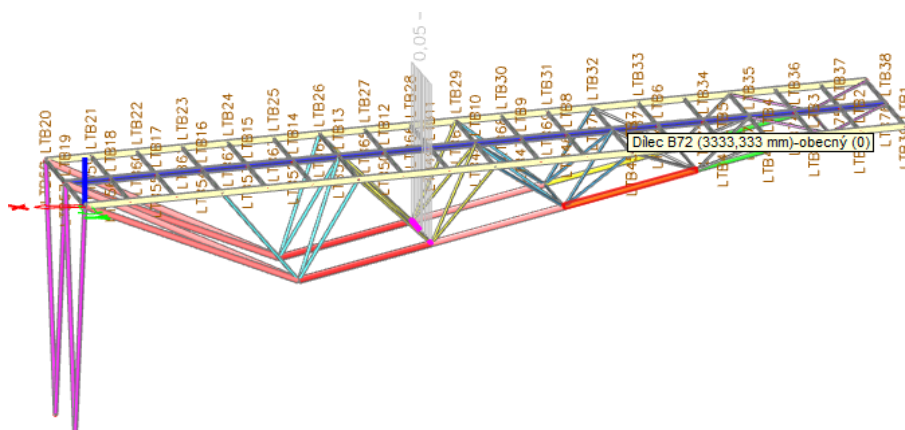
Využití průřezu je 5 % → vyhovuje

Pruty mezi dolními pásy

TR KR 63,5 x 6,3 mm

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

$1,35 \cdot \text{vlastní tíha} + 1,35 \cdot \text{stálé} + 0,75 \cdot \text{sníh} + 1,5 \cdot \text{vítr ve směru 1 (tlak)}$



Obrázek 4.42 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Posouzení na vzpěrný tlak

Návrhová hodnota normálové tlakové síly

$$N_{Ed} = 0,20 \text{ kN}$$

Využití průřezu je méně než 1 % → vyhovuje

Posouzení na vzpěrný tlak spolu s ohybovými momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 0,16 \text{ kNm}$$

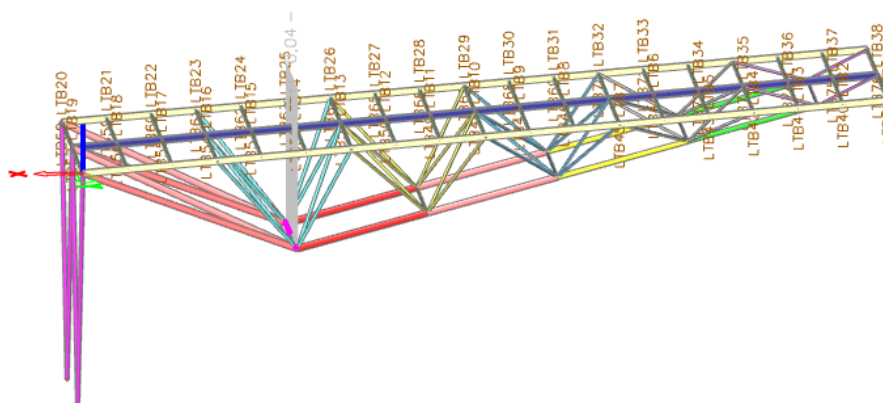
Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,12 \text{ kNm}$$

Využití průřezu je 4 %. → vyhovuje

Pruty mezi dolními pásy

TR KR 76,1 x 6,3 mm



Obrázek 4.43 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Posouzení na tah a vzpěrný tlak

Hodnota tlakové i tahové síly je 0, posudek tedy není potřeba.

Posouzení na ohybové momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 0,20 \text{ kNm}$$

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,15 \text{ kNm}$$

Využití průřezu je 4 % → vyhovuje

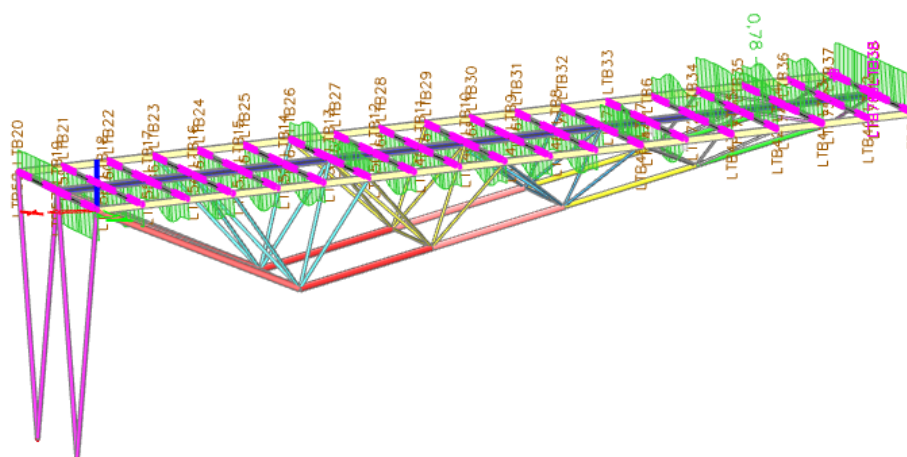
Stropnice

UPE 100

Posudek pomocí Scia Engineer

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

1 . vlastní tíha + 1 . stálé + 1,5 . vítr ve směru 1 (sání)



Obrázek 4.44 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Tabulka 4.16 – Posudek na vzpěr pomocí Scia Engineer 18.1

Posudek rovinného vzpěru

Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.1.1 a rovnice (6.46)

Parametry vzpěru	yy	zz	
Typ posuvných styčníků	posuvné	neposuvné	
Systémová délka L	3,333	3,333	m
Součinitel vzpěru k	1,00	1,00	
Vzpěrná délka l_{cr}	3,333	3,333	m
Kritické Eulerovo zatížení N_{cr}	386,13	71,26	kN
Štíhlost λ	81,91	190,68	
Poměrná štíhlost λ_{rel}	0,87	2,03	
Mezní štíhlost $\lambda_{rel,0}$	0,20	0,20	
Vzpěr. křivka	c	c	
Imperfekce α	0,49	0,49	
Redukční součinitel χ	0,62	0,19	
Únosnost na vzpěr $N_{b,Rd}$	181,24	56,15	kN
Posudek rovinného vzpěru			
Průřezová plocha A	1,2500e-03	m ²	
Únosnost na vzpěr $N_{b,Rd}$	56,15	kN	
Jedn. posudek	0,46	-	

Tabulka 4.17 – Posudek na ohyb s osovým tlakem pomocí Scia Engineer 18.1

Posudek ohybu a osového tlaku

Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.3 a rovnice (6.61), (6.62)

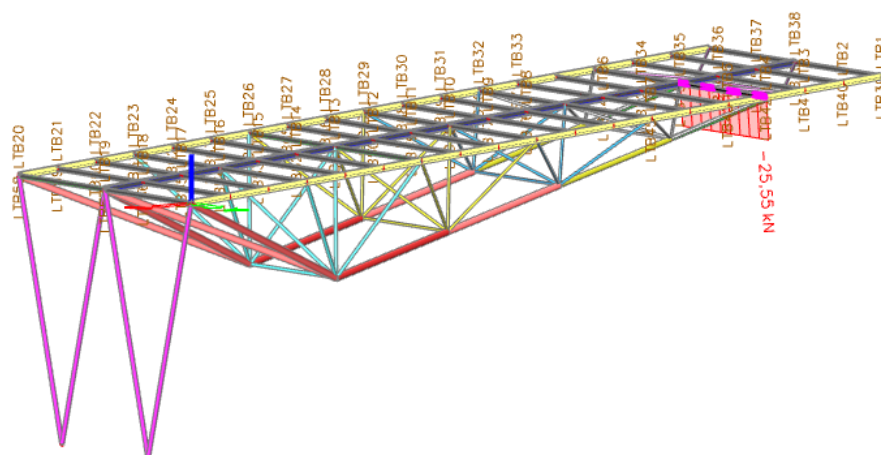
Parametry pro posudek ohybu a osového tlaku		
Interakční metoda	alternativní metoda 1	
Průřezová plocha A	1,2500e-03	m ²
Plastický modul průřezu $W_{pl,y}$	4,8000e-05	m ³
Plastický modul průřezu $W_{pl,z}$	1,8900e-05	m ³
Návrhová tlaková síla N_{Ed}	25,55	kN
Návrhový ohybový moment (maximum) $M_{y,Ed}$	-3,51	kNm
Návrhový ohybový moment (maximum) $M_{z,Ed}$	0,27	kNm
Charakteristická tlaková únosnost N_{Rk}	293,75	kN
Charakteristická momentová únosnost $M_{y,Rk}$	11,28	kNm
Charakteristická momentová únosnost $M_{z,Rk}$	4,44	kNm
Redukční součinitel χ_y	0,62	
Redukční součinitel χ_z	0,19	
Redukční součinitel χ_{LT}	1,00	
Interakční součinitel k_{yy}	1,46	
Interakční součinitel k_{yz}	1,40	
Interakční součinitel k_{zy}	0,77	
Interakční součinitel k_{zz}	1,36	

Parametry interakční metody 1		
Kritické Eulerovo zatížení $N_{cr,y}$	386,13	kN
Kritické Eulerovo zatížení $N_{cr,z}$	71,26	kN
Pružné kritické zatížení $N_{cr,T}$	488,61	kN
Plastický modul průřezu $W_{el,y}$	4,8000e-05	m ³
Pružný modul průřezu $W_{el,y}$	4,1400e-05	m ³
Plastický modul průřezu $W_{el,z}$	1,8900e-05	m ³
Pružný modul průřezu $W_{el,z}$	1,0600e-05	m ³
Momentsetrvačnost $I_{y,y}$	2,0700e-06	m ⁴
Momentsetrvačnost $I_{y,z}$	3,8200e-07	m ⁴
Momentsetrvačnost $I_{z,z}$	2,0100e-08	m ⁴
Metoda pro součinitel ekvivalentního momentu $C_{my,0}$	Tabulka A.2 řádek 4 (liniové zatížení)	
Součinitel ekvivalentního momentu $C_{my,0}$	1,00	
Metoda pro součinitel ekvivalentního momentu $C_{mz,0}$	Tabulka A.2 řádek 4 (liniové zatížení)	
Součinitel ekvivalentního momentu $C_{mz,0}$	1,01	
Součinitel μ_y	0,97	
Součinitel μ_z	0,69	
Součinitel η_y	4,15	
Součinitel α_T	0,99	
Kritický moment pro rovnoměrný ohyb $M_{cr,0}$	295,10	kNm
Poměrná štíhlost $\lambda_{rel,0}$	0,20	
Limitní relativní štíhlost $\lambda_{rel,0,lim}$	0,18	
Součinitel ekvivalentního momentu C_{my}	1,00	
Součinitel ekvivalentního momentu C_{mz}	1,01	
Součinitel ekvivalentního momentu C_{mLT}	1,27	
Součinitel b_T	0,00	
Součinitel c_T	0,01	
Součinitel d_T	0,00	
Součinitel e_T	0,01	
Součinitel w_f	1,16	
Součinitel w_e	1,50	
Součinitel n_{ex}	0,09	
Maximální relativní štíhlost $\lambda_{rel,max}$	2,03	
Součinitel $C_{\eta y}$	0,91	
Součinitel $C_{\eta z}$	0,75	
Součinitel $C_{\eta y}$	0,65	
Součinitel $C_{\eta z}$	0,80	

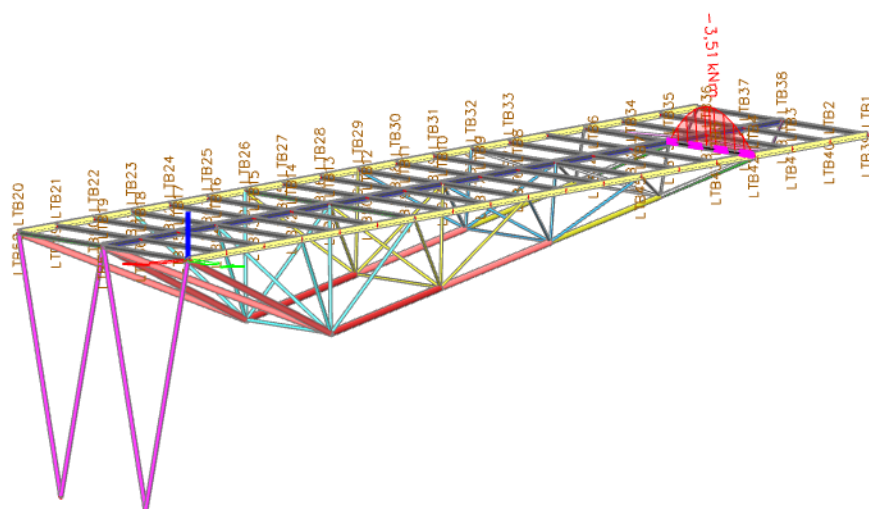
Posudek(6.61) = 0,14 + 0,45 + 0,08 = 0,68

Posudek(6.62) = 0,46 + 0,24 + 0,08 = 0,78

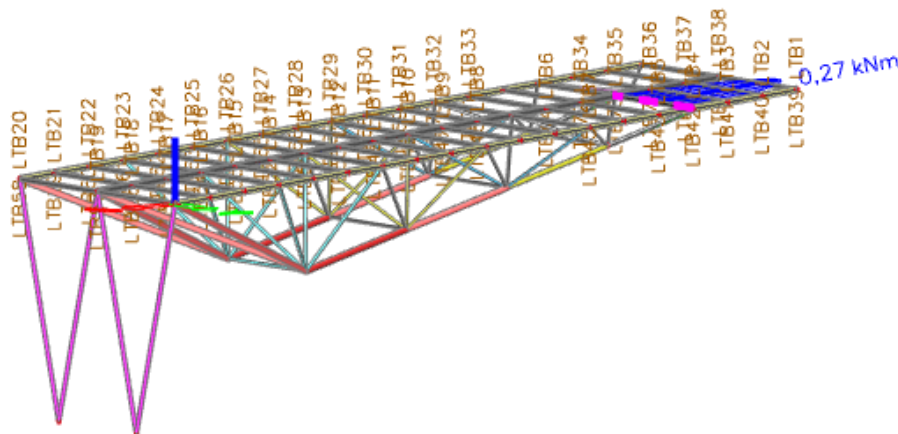
Ruční ověření výpočtu



Obrázek 4.45 – Vnitřní síly (normálové) na stropnici pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez



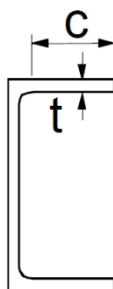
Obrázek 4.46 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru y) na stropnici pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez



Obrázek 4.47 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru z) na stropnici pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez

Zatřídění průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{41}{7,5} = 5,47 \leq 9 \quad \varepsilon = 9,1 = 9 \rightarrow \text{průřez třídy 1} \quad (4.70)$$



Obrázek 4.48 – Vyznačení rozměrů U profilů potřebných pro zatřídění průřezu

Průřezová plocha

$$A = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Průřezový modul v elastické a plastické oblasti pro směr y (osa kolmá ke stojině) a z (osa kolmá k pásnicím)

$$W_{el,y} = 4,14 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$W_{pl,y} = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$W_{el,z} = 1,06 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$W_{pl,z} = 1,89 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Posouzení na vzpěrný tlak

Návrhová hodnota normálové tlakové síly

$$N_{Ed} = 25,55 \text{ kN}$$

Vzpěrná délka

$$L_{cr} = 3,333 \text{ m}$$

Moment setrvačnosti průřezu pro směry y a z (konvence stejná jako pro průřezový modul)

$$I_y = 2,07 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_z = 0,382 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

Pružná kritická síla určená pro vlastnosti plného průřezu pro směry y a z

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 2,07 \cdot 10^{-6}}{3,333^2} = 386,21 \text{ kN} \quad (4.71)$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 0,382 \cdot 10^{-6}}{3,333^2} = 71,27 \text{ kN} \quad (4.72)$$

Poměrná štíhlost prutu pro směry y a z

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{386,21 \cdot 10^3}} = 0,872 \quad (4.73)$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{71,27 \cdot 10^3}} = 2,030 \quad (4.74)$$

Křivka vzpěrné pevnosti c (pro U průřezy v obou směrech), součinitel imperfekce $\alpha = 0,49$.

Hodnota pro výpočet součinitele vzpěrnosti

$$\phi_y = 0,5[1 + \alpha (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5[1 + 0,49(0,872 - 0,2) + 0,872^2] = 1,045 \quad (4.75)$$

$$\phi_z = 0,5[1 + \alpha (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5[1 + 0,49(2,030 - 0,2) + 2,030^2] = 3,009 \quad (4.76)$$

Součinitel vzpěrnosti pro příslušný způsob vybočení ve směru y a z

$$\kappa_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{1,045 + \sqrt{1,045^2 - 0,872^2}} = 0,620 \quad (4.77)$$

$$\kappa_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{3,009 + \sqrt{3,009^2 - 2,030^2}} = 0,191 \quad (4.78)$$

Návrhová vzpěrná únosnost tlačeneho prutu pro směry y a z

$$N_{b,Rd,y} = \frac{\kappa_y \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,620 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 182,13 \text{ kN} \quad (4.79)$$

$$N_{b,Rd,z} = \frac{\kappa_z \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,191 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 56,11 \text{ kN} \quad (4.80)$$

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{25,55}{56,11} = 0,46 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (4.36)$$

Posouzení na vzpěrný tlak spolu s ohybovými momenty

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru y

$$M_{y,Ed} = 3,51 \text{ kNm}$$

Návrhová hodnota ohybového momentu ve směru z

$$M_{z,Ed} = 0,27 \text{ kNm}$$

Výpočet interakčních součinitelů podle metody 1 z přílohy A normy [4]

Klopení průřezu od svislých zatížení působících ve směru gravitace brání tuhý střešní trapézový plech, klopení od svislého zatížení v opačném směru (sání větru) nenastane, jelikož zatížení působí především na horní pásnici $\rightarrow \chi_{LT} = 1$

Poloměr setrvačnosti k ose y a z

$$i_y = 41 \text{ mm}$$

$$i_z = 17 \text{ mm}$$

y-ová a z-ová souřadnice středu smyku

$$y_0 = 40 \text{ mm}$$

$$z_0 = 0 \text{ mm}$$

Nejmenší poloměr setrvačnosti na druhou

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 = 41^2 + 17^2 + 40^2 + 0^2 = 3570 \text{ mm}^2 \quad (4.81)$$

Moment tuhosti v prostém kroucení

$$I_t = 2,01 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

Výsečový moment setrvačnosti

$$I_w = 5,6812 \cdot 10^{-10} \text{ m}^6$$

Vzpěrná délka pro kroucení

$$L_{cr,T} = 3,333 \text{ m}$$

Pružná kritická vzpěrná síla při vybočení zkroucením

$$\begin{aligned} N_{cr,T} &= \frac{1}{i_0^2} \left[G I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{cr,T}^2} \right] = \\ &= \frac{1}{3570 \cdot 10^{-3}} \left[81 \cdot 10^9 \cdot 2,01 \cdot 10^{-8} + \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 5,6812 \cdot 10^{-10}}{3,333^2} \right] = 485,74 \text{ kN} \end{aligned} \quad (4.82)$$

Součinitel dle [4]

$$c_{my,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 1 + 0,03 \frac{25,55}{386,21} = 1,002 \quad (4.83)$$

Poměrné přetvoření

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{3,51}{25,55} \frac{1,25 \cdot 10^{-3}}{4,14 \cdot 10^{-5}} = 4,148 \quad (4.84)$$

Součinitel dle [4] pro směr y

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} = 1 - \frac{2,01 \cdot 10^{-8}}{2,07 \cdot 10^{-6}} = 0,990 \quad (4.85)$$

Součinitel ekvivalentního konstantního momentu

$$\begin{aligned} c_{my} &= c_{my,0} + (1 - c_{my,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} \cdot a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} \cdot a_{LT}} = \\ &= 1,002 + (1 - 1,002) \frac{\sqrt{4,148} \cdot 0,990}{1 + \sqrt{4,148} \cdot 0,990} = 1,001 \end{aligned} \quad (4.86)$$

Součinitel dle [4]

$$c_{mz,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} = 1 + 0,03 \frac{25,55}{71,27} = 1,012 \quad (4.87)$$

Součinitel ekvivalentního konstantního momentu

$$c_{mz} = c_{mz,0} = 1,012 \quad (4.88)$$

Součinitel ekvivalentního konstantního momentu

$$\begin{aligned} c_{mLT} &= c_{my}^2 \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 1,001^2 \frac{0,990}{\sqrt{\left(1 - \frac{25,55}{71,27}\right) \left(1 - \frac{25,55}{485,74}\right)}} = \\ &= 1,307 \geq 1 \end{aligned} \quad (4.89)$$

Charakteristická únosnost v prostém ohybu pro jednotlivé směry

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 4,8 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3 = 11,28 \text{ kNm} \quad (4.90)$$

$$M_{z,Rk} = W_{pl,z} \cdot f_y = 1,89 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3 = 4,44 \text{ kNm} \quad (4.91)$$

Plastická návrhová únosnost v prostém ohybu pro jednotlivé směry

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{4,8 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 11,28 \text{ kNm} \quad (4.92)$$

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{1,89 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 4,44 \text{ kNm} \quad (4.93)$$

Charakteristická únosnost v prostém tlaku

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^3 = 293,75 \text{ kN} \quad (4.41)$$

Součinitelé dle [4]

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} = \frac{4,8 \cdot 10^{-5}}{4,14 \cdot 10^{-5}} = 1,16 \leq 1,5 \quad (4.94)$$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} = \frac{1,89 \cdot 10^{-5}}{1,06 \cdot 10^{-5}} = 1,78 \leq 1,5 \rightarrow \text{dále uvažováno } 1,5 \quad (4.95)$$

Součinitel dle [4]

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{\frac{N_{Rk}}{\gamma_{M0}}} = \frac{25,55}{\frac{293,75}{1}} = 0,087 \quad (4.44)$$

Součinitelé dle [4] pro jednotlivé směry

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \kappa_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \frac{25,55}{386,21}}{1 - 0,620 \cdot \frac{25,55}{386,21}} = 0,974 \quad (4.96)$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \kappa_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \frac{25,55}{71,27}}{1 - 0,191 \cdot \frac{25,55}{71,27}} = 0,689 \quad (4.97)$$

Poměrná štíhlost pro jednotlivé směry

$$\bar{\lambda}_y = 0,872$$

$$\bar{\lambda}_z = 2,030$$

$$\bar{\lambda}_{max} = \max.(\bar{\lambda}_y; \bar{\lambda}_z) = \max.(0,872; 2,030) = 2,030 \quad (4.98)$$

Výsečový moment setrvačnosti

$$I_w = 5,6812 \cdot 10^{-10} \text{ m}^6$$

Délka nosníku mezi body zajištěnými proti posunu kolmo z roviny

$$L = 0,333 \text{ m (vzdálenost vzpěr reprezentující treapézový plech)}$$

Součinitelé vzpěrné délky

$$k_w = k_z = 1,0 \quad (4.48)$$

Bezrozměrný parametr kroucení

$$\kappa_{wt} = \frac{\pi}{k_w L} \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}} = \frac{\pi}{1,0,333} \sqrt{\frac{210 \cdot 5,6812 \cdot 10^{-10}}{81 \cdot 2,01 \cdot 10^{-8}}} = 2,554 \quad (4.49)$$

Souřadnice působíště zatížení vzhledem k těžišti průřezu

$$z_a = 0 \text{ mm}$$

Souřadnice středu smyku vzhledem k těžišti průřezu

$$z_s = 0 \text{ mm}$$

Souřadnice působíště zatížení vzhledem ke středu smyku

$$z_g = z_a - z_s = 0 - 0 = 0 \text{ mm} \quad (4.50)$$

Bezrozměrný parametr působíště zatížení vzhledem ke středu smyku

$$\zeta_g = \frac{\pi \cdot z_g}{k_z \cdot L} \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} = \frac{\pi \cdot 0}{1,0 \cdot 0,333} \sqrt{\frac{210 \cdot 3,82 \cdot 10^{-7}}{81 \cdot 2,01 \cdot 10^{-8}}} = 0 \quad (4.51)$$

Rozměr dle [4]

$$z_j = 0 \text{ pro průřezy symetrické dle osy } y - y$$

Bezrozměrný parametr nesymetrie průřezu

$$\zeta_j = \frac{\pi \cdot z_j}{k_z \cdot L} \sqrt{\frac{EI_z}{GI_t}} = \frac{\pi \cdot 0}{1,0 \cdot 0,333} \sqrt{\frac{210 \cdot 3,82 \cdot 10^{-7}}{81 \cdot 2,01 \cdot 10^{-8}}} = 0 \quad (4.52)$$

Součinitele závislé na zatížení a podmínkách uložení konců

$$C_1 = 1; C_2 = 1; C_3 = 1$$

Bezrozměrný kritický moment

$$\mu_{cr} = \frac{C_1}{k_z} \left[\sqrt{1 + \kappa_{wt}^2 + (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j)^2} - (C_2 \zeta_g - C_3 \zeta_j) \right] = \quad (4.53)$$

$$\frac{1}{1} \left[\sqrt{1 + 2,554^2 + (1,0 - 1,0)^2} - (1,0 - 1,0) \right] = 2,743$$

Pružný kritický moment

$$M_{cr} = \mu_{cr} \frac{\pi \sqrt{EI_z GI_t}}{L} = 2,743 \frac{\pi \sqrt{210 \cdot 10^6 \cdot 3,82 \cdot 10^{-7} \cdot 81 \cdot 10^6 \cdot 2,01 \cdot 10^{-8}}}{0,333} = \quad (4.54)$$

$$= 295,72 \text{ kNm}$$

Poměrná štíhlost při klopení od konstantního ohybového momentu pro poměr koncových momentů $\Psi = 1$

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{M_{y,Rk}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{11,28}{295,72}} = 0,195 \quad (4.55)$$

Součinitelé dle [4]

$$b_{LT} = 0,5 \cdot a_{LT} \cdot \bar{\lambda}_0^2 \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = 0,5 \cdot 0,990 \cdot 0,195^2 \cdot \frac{3,51}{1,11,28} \cdot \frac{0,27}{4,44} = \quad (4.56)$$

$$= 3,562 \cdot 10^{-4}$$

$$c_{LT} = 10 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{c_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} = 10 \cdot 0,99 \cdot \frac{0,195^2}{5 + 2,03^4} \cdot \frac{3,51}{1,001 \cdot 1 \cdot 11,28} = \quad (4.57)$$

$$= 5,342 \cdot 10^{-3}$$

$$d_{LT} = 2 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{c_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{c_{mz} \cdot M_{pl,z,Rd}} = \quad (4.58)$$

$$= 2 \cdot 0,990 \cdot \frac{0,195}{0,1 + 2,030^4} \cdot \frac{3,51}{1,001 \cdot 1 \cdot 11,28} \cdot \frac{0,27}{1,012 \cdot 4,44} = 4,222 \cdot 10^{-4}$$

$$e_{LT} = 1,7 \cdot a_{LT} \cdot \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{c_{my} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} = \quad (4.59)$$

$$= 1,7 \cdot 0,990 \cdot \frac{0,195}{0,1 + 2,030^4} \cdot \frac{3,51}{1,001 \cdot 1 \cdot 11,28} = 5,972 \cdot 10^{-3}$$

$$c_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} c_{my}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_y} c_{my}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] = \quad (4.99)$$

$$1 + (1,16 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,16} 1,001^2 \cdot 2,030 - \frac{1,6}{1,16} 1,001^2 \cdot 2,030^2 \right) 0,087 - 3,562 \cdot 10^{-4} \right] =$$

$$= 0,909 \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} = \frac{4,14 \cdot 10^{-5}}{4,8 \cdot 10^{-5}} = 0,863 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,909$$

$$c_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{c_{mz}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] = \quad (4.100)$$

$$1 + (1,5 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,012^2 \cdot 2,030^2}{1,5^5} \right) 0,087 - 5,324 \cdot 10^{-3} \right] =$$

$$= 0,746 \geq 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \cdot \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,5}{1,16}} \cdot \frac{4,14 \cdot 10^{-5}}{4,8 \cdot 10^{-5}} = 0,588 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,746$$

$$c_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{c_{my}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] = \quad (4.101)$$

$$1 + (1,16 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,001^2 \cdot 2,030^2}{1,16^5} \right) 0,087 - 4,222 \cdot 10^{-4} \right] =$$

$$= 0,628 \geq 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \cdot \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} = 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,16}{1,5}} \cdot \frac{1,06 \cdot 10^{-5}}{1,89 \cdot 10^{-5}} = 0,296 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,628$$

$$c_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} c_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_z} c_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - e_{LT} \right] = \quad (4.102)$$

$$= 1 + (1,5 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,5} 1,012^2 \cdot 2,030 - \frac{1,6}{1,5} 1,012^2 \cdot 2,030^2 \right) 0,087 - 5,972 \cdot 10^{-3} \right] =$$

$$= 0,792 \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} = \frac{1,06 \cdot 10^{-5}}{1,89 \cdot 10^{-5}} = 0,561 \rightarrow \text{dále uvažováno } 0,792$$

Interakční součinitelé

$$k_{yy} = c_{my} \cdot c_{mLT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{c_{yy}} = 1,001 \cdot 1,307 \cdot \frac{0,974}{1 - \frac{25,55}{386,21}} \cdot \frac{1}{0,909} = 1,501 \quad (4.103)$$

$$k_{yz} = c_{mz} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{c_{yz}} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} = 1,012 \cdot \frac{0,974}{1 - \frac{25,55}{71,27}} \cdot \frac{1}{0,746} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,5}{1,16}} = 1,405 \quad (4.104)$$

$$k_{zy} = c_{my} \cdot c_{mLT} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \cdot \frac{1}{c_{zy}} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} = 1,001 \cdot 1,307 \cdot \frac{0,689}{1 - \frac{25,55}{386,21}} \cdot \frac{1}{0,628} \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{1,16}{1,5}} = 0,811 \quad (4.105)$$

$$k_{zz} = c_{mz} \cdot \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \cdot \frac{1}{c_{zz}} = 1,012 \cdot \frac{0,689}{1 - \frac{25,55}{71,27}} \cdot \frac{1}{0,792} = 1,372 \quad (4.106)$$

Využití průřezu

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \cdot \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \cdot \frac{\frac{M_{z,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1 \quad (4.68)$$

$$\frac{\frac{25,55}{0,620 \cdot 293,75}}{1} + 1,501 \cdot \frac{\frac{3,51}{1 \cdot 11,28}}{1} + 1,405 \cdot \frac{\frac{0,27}{1 \cdot 4,44}}{1} = 0,69 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \cdot \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \cdot \frac{\frac{M_{z,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1 \quad (4.69)$$

$$\frac{\frac{25,55}{0,191 \cdot 293,75}}{1} + 0,811 \cdot \frac{\frac{3,51}{1 \cdot 11,28}}{1} + 1,372 \cdot \frac{\frac{0,27}{1 \cdot 4,44}}{1} = 0,79 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Vliv ohybových momentů je v případě stropnic dominantní. V únosnosti pro kombinaci osové síly a ohybu tvoří využití na ohybový moment 55 % ve směru y a 33 % ve směru z.

Porovnání výpočtu interakčních součinitelů podle metody 2 z přílohy B normy [4] získaných ze Scia Engineer 18.1.

Tabulka 4.18 – Interakční součinitelé podle metody 2 získané ze Scia Engineer 18.1

Posudek ohybu a osového tlaku

Podle EN 1993-1-1 článku 6.3.3 a rovnice (6.61), (6.62)

Parametry pro posudek ohybu a osového tlaku		
Interakční metoda	alternativní metoda 2	
Průřezová plocha A	1,2500e-03	m ²
Plastický modul průřezu W _{pl,y}	4,8000e-05	m ³
Plastický modul průřezu W _{pl,z}	1,8900e-05	m ³
Návrhová tlaková síla N _{Ed}	25,55	kN
Návrhový ohybový moment (maximum) M _{y,Ed}	-3,51	kNm
Návrhový ohybový moment (maximum) M _{z,Ed}	0,27	kNm
Charakteristická tlaková únosnost N _{Rk}	293,75	kN
Charakteristická momentová únosnost M _{y,Rk}	11,28	kNm
Charakteristická momentová únosnost M _{z,Rk}	4,44	kNm
Redukční součinitel χ _y	0,62	
Redukční součinitel χ _z	0,19	
Redukční součinitel χ _{LT}	1,00	
Interakční součinitel k _{yy}	0,99	
Interakční součinitel k _{yz}	0,93	
Interakční součinitel k _{zy}	0,94	
Interakční součinitel k _{zz}	1,56	

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.68)$$

$$\frac{25,55}{\frac{0,620 \cdot 293,75}{1}} + 0,99 \cdot \frac{3,51}{\frac{1 \cdot 11,28}{1}} + 0,93 \cdot \frac{0,27}{\frac{1 \cdot 4,44}{1}} = 0,50 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.69)$$

$$\frac{25,55}{\frac{0,191 \cdot 293,75}{1}} + 0,94 \cdot \frac{3,51}{\frac{1 \cdot 11,28}{1}} + 1,56 \cdot \frac{0,27}{\frac{1 \cdot 4,44}{1}} = 0,84 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Výsledky každé z metod se liší. Ve směru y se využití liší o 19 %. Bezpečněji se chová metoda 1 z přílohy A normy [4]. Pro směr z se využití liší o 5 %. V tomto případě se naopak na bezpečnou stranu přiklání metoda 2 z přílohy B normy [4]. Stejně rozdílné výsledky vykazuje i výpočet ve Scia Engineer 18.1. Všechny ostatní stropnice mají stejnou dimenzi i geometrii. Žádná z nich není namáhána více, než tato posuzovaná. Proto všechny ostatní vyhoví automaticky.

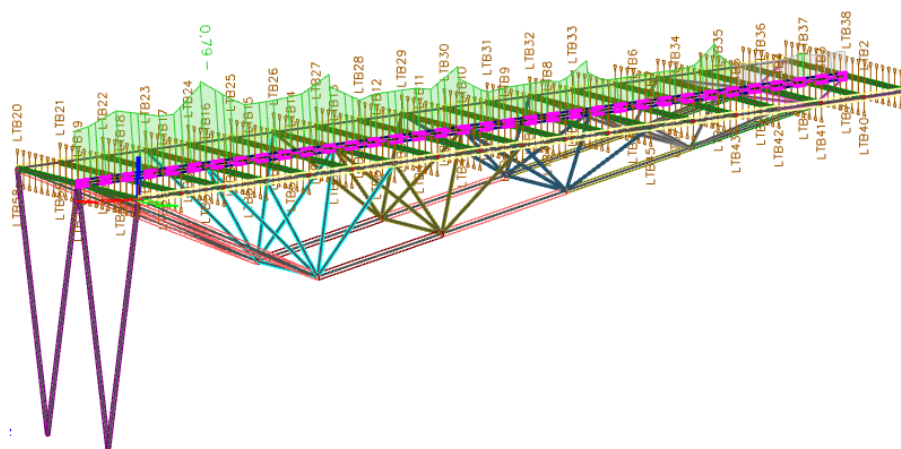
Horní pás

2 x UPE 160 (svařeno po délce)

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

$1,35 \cdot \text{vlastní tíha} + 1,35 \cdot \text{stálé} + 0,75 \cdot \text{sníh} + 1,5 \cdot \text{vítr ve směru 1 (tlak)}$

Posudek pomocí Scia Engineer



Obrázek 4.49 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Tabulka 4.19 – Posudek na kombinaci ohybu, osové a smykové síly pomocí Scia Engineer 18.1

Posudek na tah

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.3 a rovnice (6.5)

A	4,3369e-03	m ²
N _{pl,Rd}	1019,17	kN
N _{u,Rd}	1124,13	kN
N _{t,Rd}	1019,17	kN
Jedn. posudek	0,50	-

Posudek ohybového momentu pro M_y

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.5 a rovnice (6.12), (6.13)

W _{pl,y}	2,6337e-04	m ³
M _{pl,y,Rd}	61,89	kNm
Jedn. posudek	0,28	-

Posudek ohybového momentu pro M_z

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.5 a rovnice (6.12), (6.13)

W _{pl,z}	9,8399e-05	m ³
M _{pl,z,Rd}	23,12	kNm
Jedn. posudek	0,01	-

Posudek smyku pro V_y

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.6 a rovnice (6.17)

η	1,20	-
A _v	2,7836e-03	m ²
V _{pl,y,Rd}	377,67	kN
Jedn. posudek	0,00	-

Posudek smyku pro \dot{V}_z

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.6 a rovnice (6.17)

η	1,20	
A_v	1,7954e-03	m ²
$V_{pl,z,Rd}$	243,59	kN
Jedn. posudek	0,06	-

Poznámka: Z průřezových charakteristik není získána žádná smyková plocha.

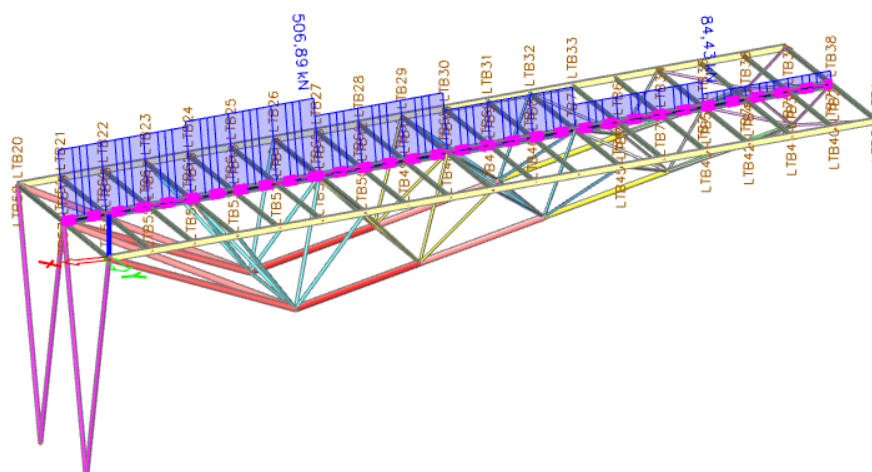
Posudek na kombinaci ohybu, osově a smykové síly

Podle EN 1993-1-1 článku 1.2.6 a rovnice (6.2)

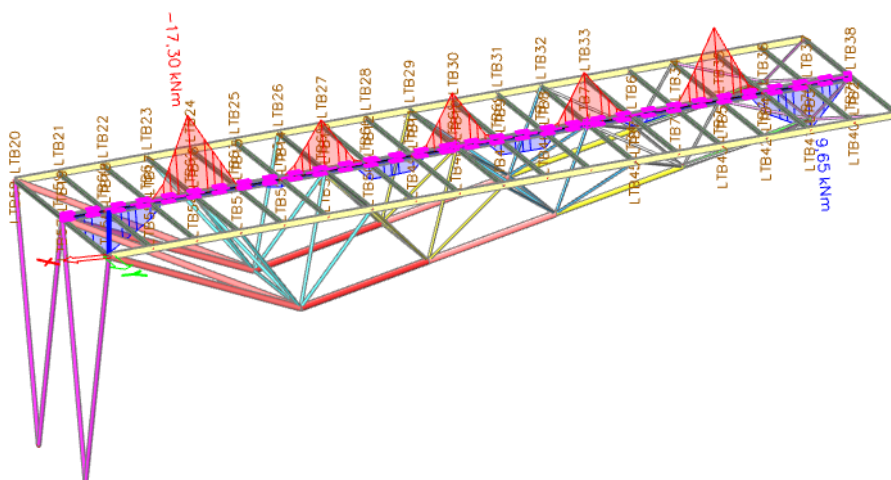
$N_{pl,Rd}$	1019,17	kN
$M_{pl,y,Rd}$	61,89	kNm
$M_{pl,z,Rd}$	23,12	kNm

Jednotkový posudek (6.2) = 0,50 + 0,28 + 0,01 = 0,79 -

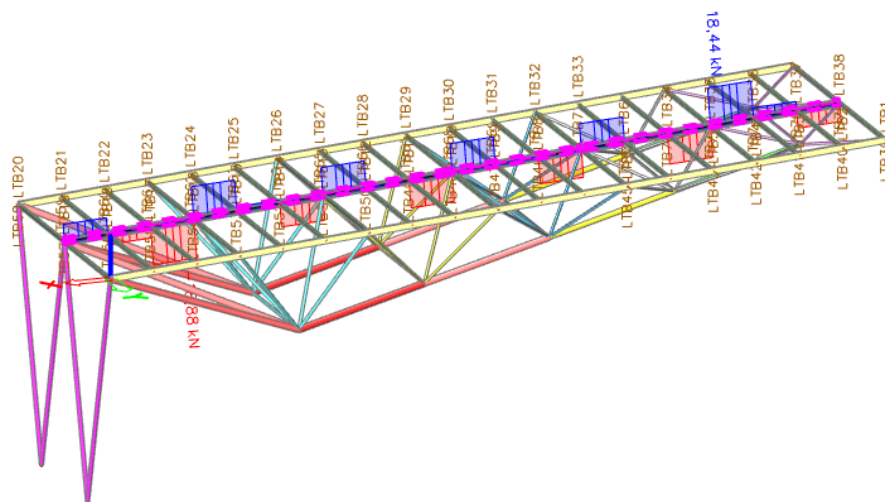
Ruční ověření výpočtu



Obrázek 4.50 – Vnitřní síly (normálové) na průběžném horním pásu pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez



Obrázek 4.51 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru y) na průběžném horním pásu
pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez



Obrázek 4.54 – Vnitřní síly (posouvající síly ve směru z) na průběžném horním pásu pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez

Zatřídění průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{53}{10} = 5,3 \leq 9 \varepsilon = 9 \cdot 1 = 9 \rightarrow \text{průřez třídy 1} \quad (4.70)$$

Posouzení na kombinaci ohybu, smyku a osově síly

Průřezová plocha

$$A = 4,3369 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Smyková plocha

$$A_v = 2,7836 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Návrhová plastická únosnost ve smyku

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{2,7836 \cdot 10^{-3} \cdot (235 \cdot 10^3 / \sqrt{3})}{1} = 377,67 \text{ kN} \quad (4.107)$$

Návrhová hodnota dominantní posouvající síly

$$V_{z,Ed} = 18,44 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} = 18,44 \text{ kN} \leq 0,5 V_{pl,Rd} = 0,5 \cdot 377,67 = 188,84 \text{ kN} \quad (4.108)$$

→ vliv smyku lze zanedbat

Plastická únosnost v tahu neoslabeného průřezu

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{4,3369 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 1019,17 \text{ kN} \quad (4.109)$$

Plastický průřezový modul pro jednotlivé směry

$$W_{pl,y} = 2,6337 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$W_{pl,z} = 9,8399 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Plastická návrhová únosnost v prostém ohybu pro jednotlivé směry

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{2,6337 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 61,89 \text{ kNm} \quad (4.92)$$

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{9,8399 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 23,12 \text{ kNm} \quad (4.93)$$

Využití průřezu

$$\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \leq 1 \quad (4.110)$$

$$\frac{0,32}{23,12} + \frac{17,3}{61,89} + \frac{504,80}{1019,17} = 0,79 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Tento postup je konzervativní, při potřebě lepšího využití průřezu by bylo možné použít vztah s redukováným momentem únosnosti z [4] kapitoly 6.2.9.1.

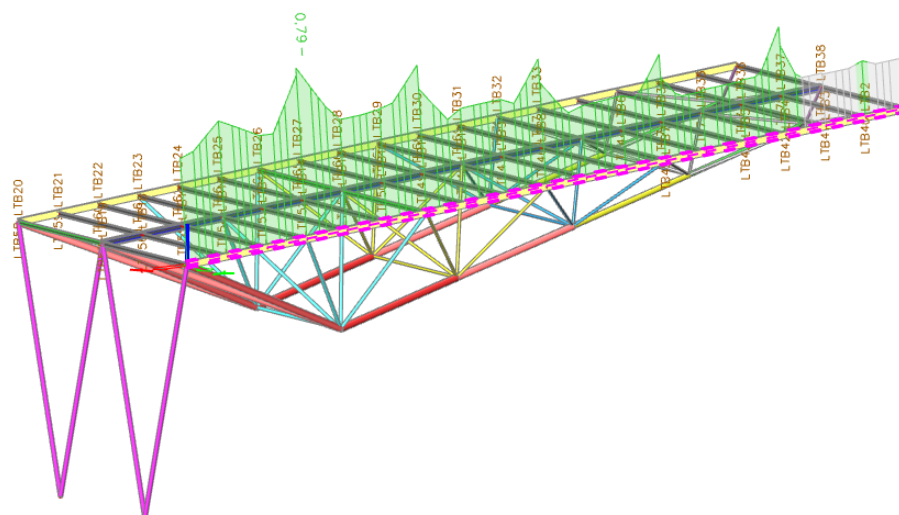
Horní pás

UPE 160

Posudek pomocí Scia Engineer

Kombinace zatížení pro největší využití průřezu:

1,35 · vlastní tíha + 1,35 · stálé + 0,75 · sníh + 1,5 · vítr ve směru 1 (tlak)



Obrázek 4.55 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1

Tabulka 4.20 – Posudek na kombinaci ohybu, osové a smykové síly pomocí Scia Engineer 18.1

Posudek na tah

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.3 a rovnice (6.5)

A	2,1700e-03	m ²
N _{pl,Rd}	509,95	kN
N _{u,Rd}	562,46	kN
N _{t,Rd}	509,95	kN
Jedn. posudek	0,49	-

Posudek ohybového momentu pro M_y

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.5 a rovnice (6.12), (6.13)

W _{pl,y}	1,3200e-04	m ³
M _{pl,y,Rd}	31,02	kNm
Jedn. posudek	0,28	-

Posudek ohybového momentu pro M_z

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.5 a rovnice (6.12), (6.13)

W _{pl,z}	4,0700e-05	m ³
M _{pl,z,Rd}	9,56	kNm
Jedn. posudek	0,02	-

Posudek smyku pro V_y

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.6 a rovnice (6.17)

η	1,20	
A _v	1,3300e-03	m ²
V _{pl,y,Rd}	180,45	kN
Jedn. posudek	0,00	-

Posudek smyku pro V_z

Podle EN 1993-1-1 článku 6.2.6 a rovnice (6.17)

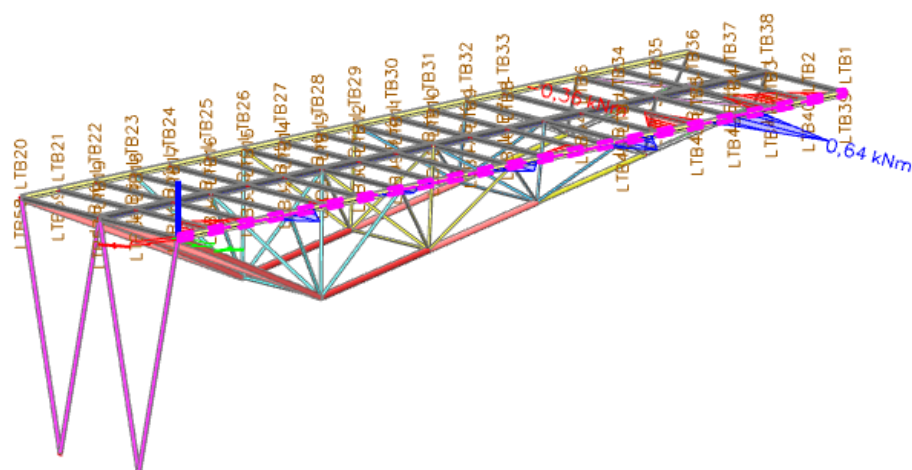
η	1,20	
A _v	1,0062e-03	m ²
V _{pl,z,Rd}	136,53	kN
Jedn. posudek	0,06	-

Posudek na kombinaci ohybu, osové a smykové síly

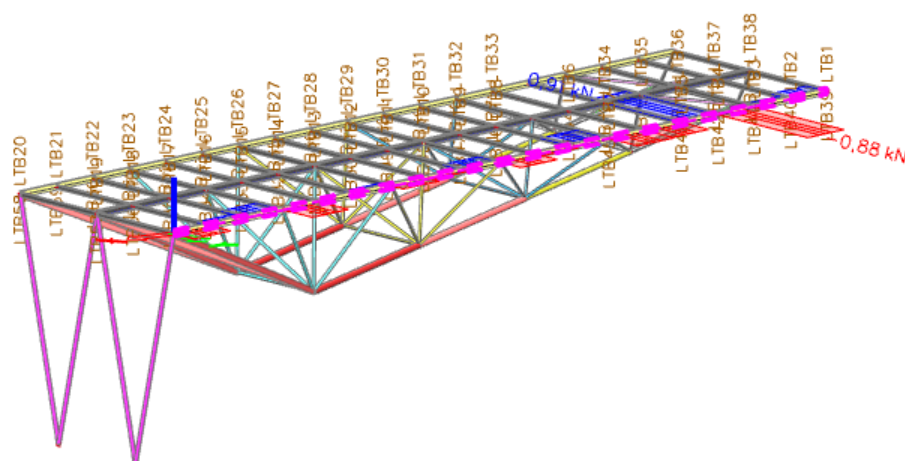
Podle EN 1993-1-1 článku 1.2.6 a rovnice (6.2)

N _{pl,Rd}	509,95	kN
M _{pl,y,Rd}	31,02	kNm
M _{pl,z,Rd}	9,56	kNm

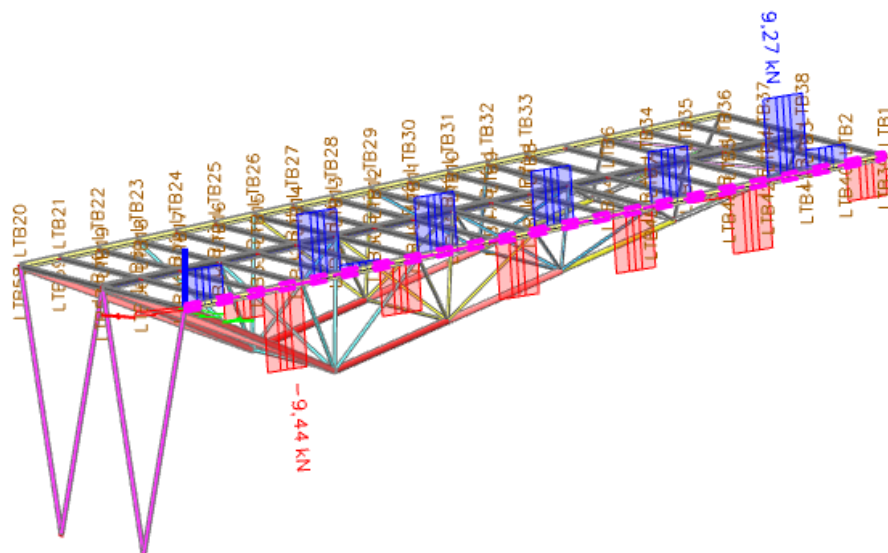
Jednotkový posudek (6.2) = 0,49 + 0,28 + 0,02 = 0,79 -



Obrázek 4.58 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru z) na krajním horním pásu pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez



Obrázek 4.59 – Vnitřní síly (posouvající síly ve směru y) na krajním horním pásu pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez



Obrázek 4.60 – Vnitřní síly (posouvající síly ve směru z) na krajním horním pásu pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez

Zatřídění průřezu

$$\frac{c}{t} = \frac{53}{10} = 5,3 \leq 9 \varepsilon = 9 \cdot 1 = 9 \rightarrow \text{průřez třídy 1} \quad (4.70)$$

Posouzení na kombinaci ohybu, smyku a osově síly

Průřezová plocha

$$A = 2,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Smyková plocha

$$A_v = 1,2522 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Návrhová plastická únosnost ve smyku

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{Mo}} = \frac{1,2522 \cdot 10^{-3} \cdot (235 \cdot 10^3 / \sqrt{3})}{1} = 169,90 \text{ kN} \quad (4.107)$$

Návrhová hodnota dominantní posouvající síly

$$V_{z,Ed} = 7,74 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} = 7,74 \text{ kN} \leq 0,5 V_{pl,Rd} = 0,5 \cdot 169,90 = 84,95 \text{ kN} \quad (4.108)$$

→ vliv smyku lze zanedbat

Plastická únosnost v tahu neoslabeného průřezu

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2,17 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 509,95 \text{ kN} \quad (4.109)$$

Plastický průřezový modul pro jednotlivé směry

$$W_{pl,y} = 1,32 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$W_{pl,z} = 4,07 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Plastická návrhová únosnost v prostém ohybu pro jednotlivé směry

$$M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{1,32 \cdot 10^{-4} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 31,02 \text{ kNm} \quad (4.92)$$

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{4,07 \cdot 10^{-5} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 9,56 \text{ kNm} \quad (4.93)$$

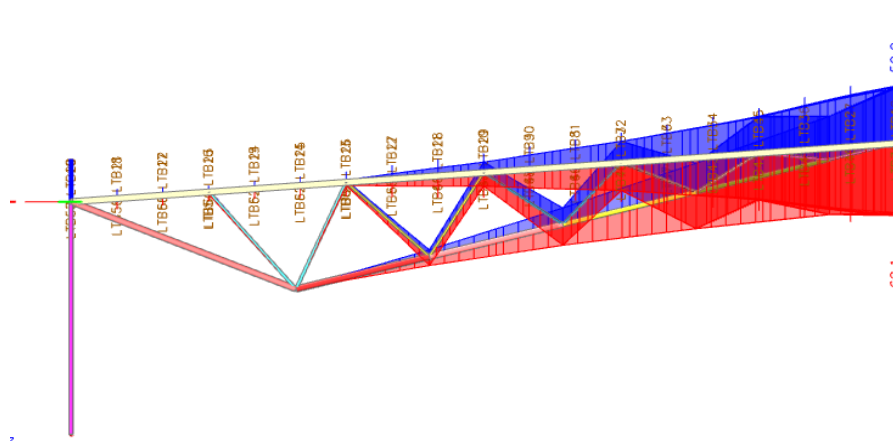
Využití průřezu

$$\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \leq 1 \quad (4.110)$$

$$\frac{0,21}{9,56} + \frac{8,66}{31,02} + \frac{249,72}{509,95} = 0,79 \leq 1 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

4.3.4 Posouzení na mezní stav použitelnosti

V mezním stavu použitelnosti je potřeba posoudit průhyb na volném konci. Zatížení jsou uvažována v charakteristických hodnotách.



Obrázek 4.61 – Svislá deformace konstrukce

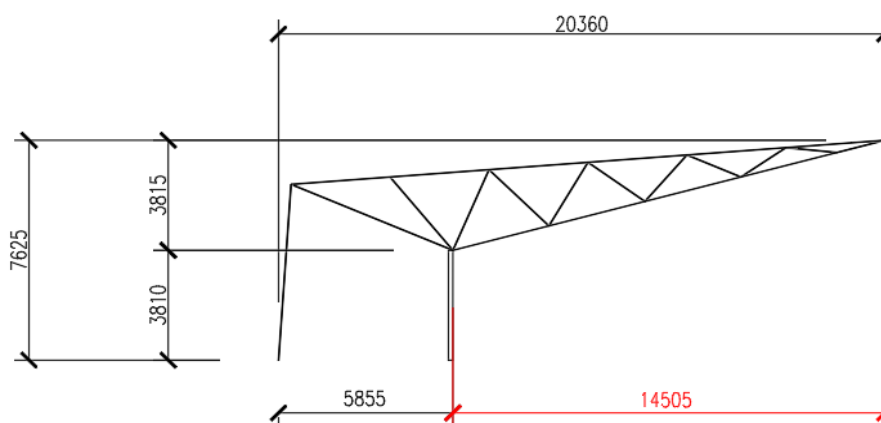
Skutečná deformace na volném konci pro MSP dle Scia Engineer 18.1:

celková deformace $\delta_{skutečná, celková} = 62,8 \text{ mm}$

svislá deformace $\delta_{skutečná, svislá} = 62,1 \text{ mm}$

Limitní deformace dle [4]:

Konstrukce zastřešení je prostorová konstrukce a norma neudává přesnou hodnotu maximálního možného průhybu. Nejblíže skutečnosti se blíží konstrukci posoudit na maximální průhyb pro délku od podpory po volný konec – viz obrázek 4.62. Délku L je možno uvažovat jako dvojnásobnou, neboť se schéma blíží konzole. Mezní hodnota δ_2 pro střešní konstrukce (vazníky) je $L/250$.

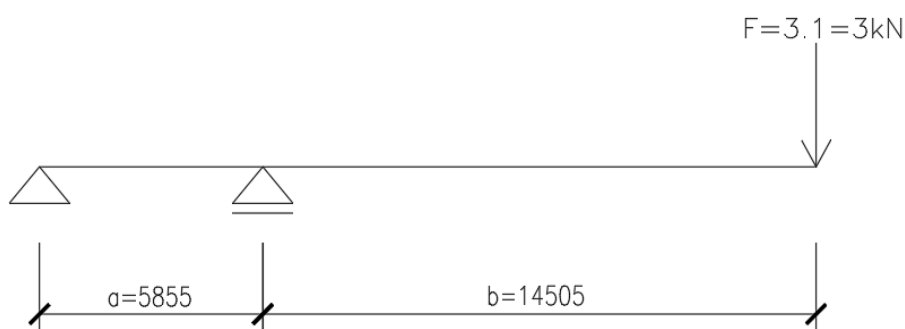


Obrázek 4.62 – Schéma konstrukce s vyznačením délky pro posudek MSP

$$\delta_{skutečná,svilsá} = 62,1 \text{ mm} \leq \frac{L}{250} = \frac{2 \cdot 14505}{250} = 116,04 \text{ mm} \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (4.111)$$

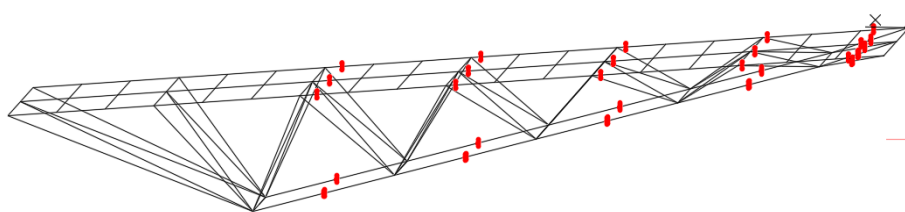
Ruční ověření výpočtu

Při velmi velkém zjednodušení lze prostorovou konstrukci v příčném řezu převést na prostý nosník s převislým koncem – viz obrázek 4.63. Pro toto schéma lze jednoduše pomocí Schwedlerových vztahů odvodit průhyb na volném konci $\delta_{schwedler}$. Při zatížení tohoto schématu silou $F = 1,3 \cdot 3 \text{ kN}$, dodržení rozměrů a a b v příčném řezu, modulu pružnosti E a momentu setrvačnosti I jako ve 3D modelu, který je také zatížen stejnými silami $3 \cdot 1 = 3 \text{ kN}$ (umístěnými vždy na volném konci jednoho horního pásu) lze očekávat podobné deformace jako z 3D modelu $\delta_{ověřovací}$.

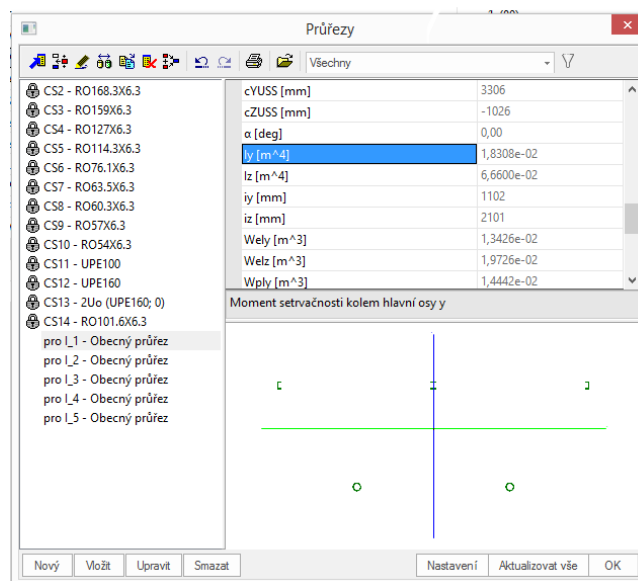


Obrázek 4.63 – Zjednodušené schéma konstrukce pro ověření výpočtu průhybu

Jediná hodnota vstupující do výpočtu průhybu, kterou nelze jednoduše přesně určit je moment setrvačnosti I . Díky různým průřezům a především šikmému hornímu a dolnímu pásu se mění po délce. Pro jeho přibližné určení byl vypočten v pěti různých řezech – viz obrázek 4.64 a následně zprůměrován. Každý z jednotlivých momentů setrvačnosti byl nalezen pomocí Scia Engineer 18.1 – viz obrázek 4.65.



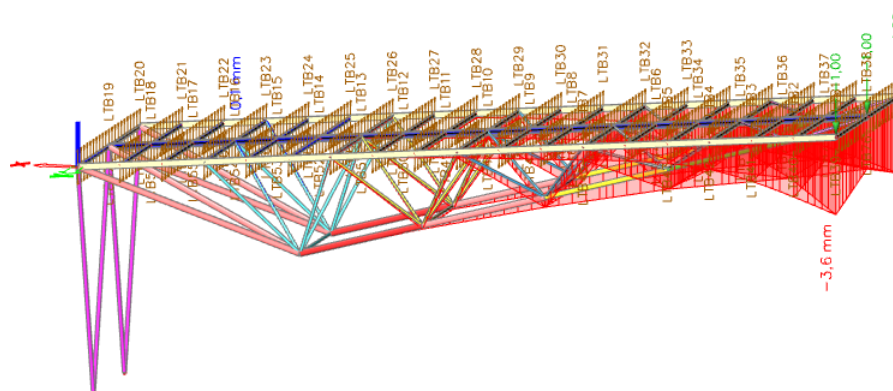
Obrázek 4.64 – Schéma konstrukce s vyznačením míst a průřezů pro výpočet momentu setrvačnosti I

Obrázek 4.65 – Ukázka nalezení momentu setrvačnosti I pomocí Scia Engineer 18.1

Přibližný moment setrvačnosti

$$I = 0,2(1,8308 \cdot 10^{10}) + 0,2(9,7274 \cdot 10^9) + 0,2(3,7387 \cdot 10^9) + 0,2(6,5267 \cdot 10^8) + 0,2(1,9776 \cdot 10^8) = 6,524906 \cdot 10^9 \text{ mm}^4 \quad (4.112)$$

$$\delta_{\text{schwedler}} = \frac{F b^2}{3 EI} (a + b) = \frac{3 \cdot 1000 \cdot 14505^2}{3 \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 6,524906 \cdot 10^9} (5855 + 14505) = 3,12 \text{ mm} \quad (4.113)$$



Obrázek 4.66 – Deformace konstrukce vypočtené na 3D modelu zatíženém třemi silami na volném konci velikosti 1 kN

$$\delta_{\text{ověřovací}} = 3,6 \text{ mm}$$

Výsledky se liší přibližně o 13 %. Tento rozdíl je přijatelný a očekávaný a je způsoben především nepřesným výpočtem momentu setrvačnosti. Dosáhnout hodnoty blížíící se skutečné by bylo možno pouze numericky. Dalším z důvodů je fakt, že na nosníku působí svislá síla kolmo na průřez, ve 3D modelu je mírně odkloněna od kolmého směru. Tento výpočet má poskytnout pouze ověření funkčnosti 3D modelu, ne přesné deformace. Z výsledků lze konstatovat, že jeho fungování je správné.

4.3.5 Lineární a nelineární analýza

Rozdíl ve výsledcích lineární a nelineární analýzy je malý. Jejich nastavení je popsáno již dříve – viz kapitola 4.3.2. Rozdíl ve vnitřních silách je do 12 %. Celková deformace na volném konci se zvětší o 11 mm. Posudky ukazují, že jednotlivé pruty vykazují dostatečnou rezervu pro MSÚ i MSP, která případné změny vnitřních sil pokryje.

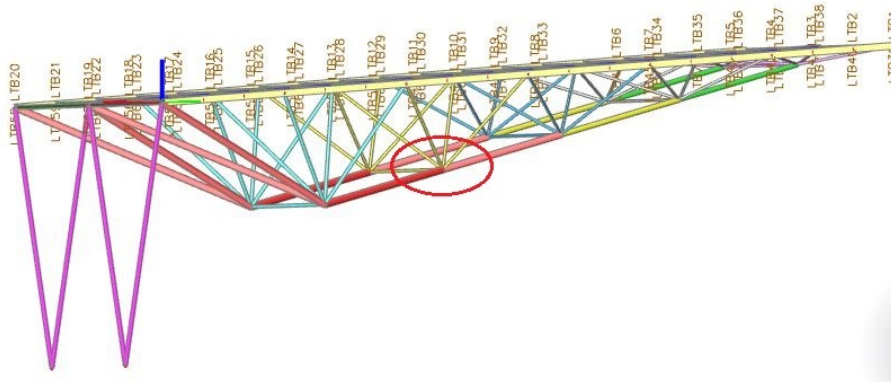
4.3.6 Analýza styčnicku

Jednotlivé pruty (diagonály, horní a dolní pásy a pruty spojující dolní pásy) jsou propojeny pomocí specifických styčnicků. Jedná se o svařované duté koule (průměru 400 mm a tloušťky stěn 10 mm), ke kterým jsou pruty navařeny. V globálním numerickém modelu jsou tyto uzly uvažovány jako kloubové. Úvaha je na stranu bezpečnou. Pro naprostou většinu prvků je dominantní vzpěrná únosnost, pro kterou je méně příznivé uložení kloubové, než tuhé. Cílem této analýzy je zhodnotit reálně fungování styčnicku.



Obrázek 4.67 – Analyzovaný styčník z duté koule

Pro důkladnější zjištění chování těchto styčníků byl jeden z nich (konkrétně – viz obrázek 4.68) vymodelován v MKP programu ANSYS 2019 R3.

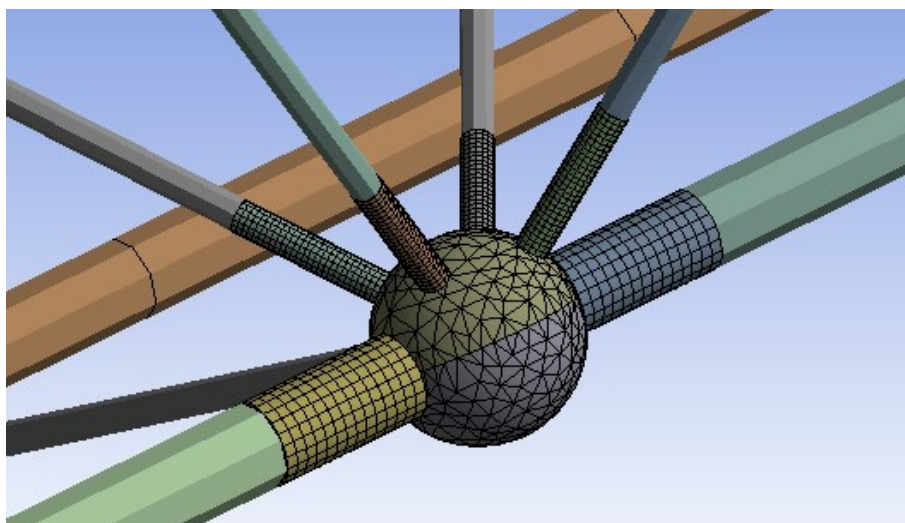


Obrázek 4.68 – Modelovaný styčnick (červené vyznačení)

Popis modelu

Geometrie modelu se sestává ze dvou částí. První je model složený z tzv. „beamů“, které představují jednotlivé pruty příhrady. Tyto prvky se v modelu nacházejí pouze z důvodu navození skutečných okrajových podmínek v posuzovaném styčnicku. Jelikož další důvod jejich využití není, není ani potřeba využívat složité konečné prvky a dělit je na jejich velké množství. Jedná se o 1D prvky. Tento typ má nejmenší počet stupňů volnosti, a díky tomu nejmenší počet rovnic, což je příznivé pro potřebnou paměť počítače a rychlost výpočtu. Geometrie byla vytvořena pomocí čar v programu AutoCAD Architecture 2017 a následně importována do ANSYS 2019 R3, kde čáry byly vzájemně propojeny v uzlech a byly jim přiděleny reálné průřezové charakteristiky. Druhou část geometrie tvoří samotný styčnick. Ten byl již při jeho vytváření v AutoCAD Architecture 2017 modelován jako reálné 3D těleso, čemuž odpovídají i konečné prvky, na které je nadělen. Konečné prvky mají 3D rozměr, který je v tomto případě žádaný. 3D prvek je, na rozdíl od 1D prvku, podstatně náročnější na výpočet, má však, především v tomto případě, podstatně větší vypovídající hodnotu výsledků. Samotný styčnick se skládá z devíti těles. Dvou dutých půlkoulí a sedmi trubek (různých dimenzí, dlouhých přibližně 400 mm od povrchu duté koule). Jednotlivé části jsou ve skutečnosti svařené, proto je jejich kontakt modelován jako „bonded“. 1D a 3D část modelu je spolu propojeny. 1D prvky končí v místě, kde začínají 3D a jejich propojení je umožněno nástrojem „joint“. Tímto je působení celé konstrukce z 1D dílců převedeno

do 3D dílců, a tím navozeny reálné okrajové podmínky na koncích modelovaných kusů trubek. Síť konečných prvků je v různých místech modelu různá. 1D prvky jsou rozděleny na nejvýše 1500 mm dlouhé části, což je pro tento případ dostačující. 3D prvky jsou naděleny podstatně hustěji. Zde je maximální velikost konečného prvku 50 mm. Celkem na modelu vzniklo 24624 uzlů a 5131 elementů (z toho 594 uzlů a 336 elementů na 1D prvcích a 24030 uzlů a 4795 elementů na 3D prvcích). Jelikož model byl vytvořen ve studentské verzi ANSYS 2019 R3, která umožňuje počítat s menším počtem uzlů a elementů, než plná verze, bylo potřeba přijmout toto omezení. Okrajové podmínky konstrukce (podpory) jsou identické jako v modelu z programu Scia Engineer 18.1. Uvažované zatížení je zvoleno pro kombinaci zatížení, která byla nejčastěji rozhodující pro statické posouzení prutů, tj. následovná: $1,35 \cdot \text{vlastní tíha} + 1,35 \cdot \text{stálé} + 0,75 \cdot \text{sníh} + 1,5 \cdot \text{vítr ve směru 1 (tlak)}$. Dolní pás, ve kterém posuzovaný styčnick leží, je tedy tlačенý. Typ oceli je stále stejný, tedy S235. Mez kluzu $f_y = 235 \text{ MPa}$, mez pevnosti $f_u = 360 \text{ MPa}$, modul pružnosti v tahu a tlaku $E = 210 \text{ GPa}$. Pro více vypovídající výsledky je zde využit bilineární pracovní diagram oceli s 5% zpevněním. Hodnota modulu zpevnění $E_2 = 10 \text{ GPa}$.

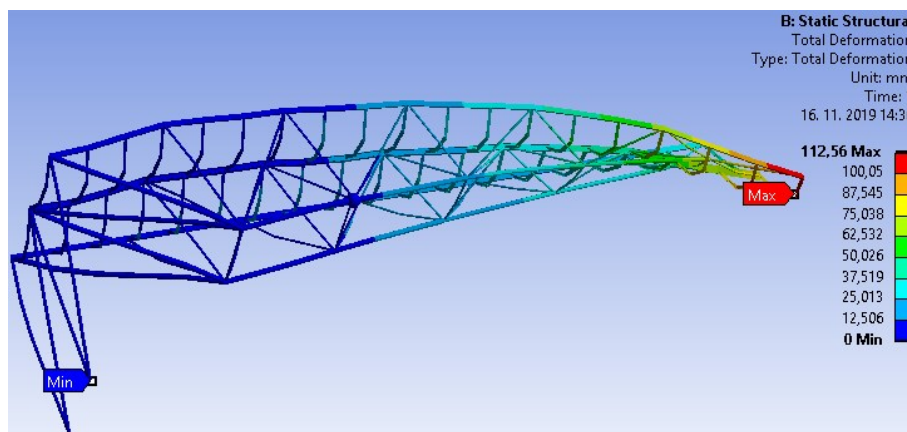


Obrázek 4.69 – Ukázka části sítě konečných prvků

Ověření výpočtu

Zkontrolováním situace, že 1D prvky se chovají obdobně jako v modelu ze Scia lze konstatovat, že jejich působení je správné a jsou předávány reálné okrajové podmínky do části modelu s 3D prvky. Celková deformace je v tomto případě 112,56 mm. V porovnání

s výsledky dle Scia Engineer 18.1 je rozdíl přibližně 4 % (při stejné kombinaci zatížení je celková deformace podle Scia 108 mm). Tento rozdíl je akceptovatelný a očekávaný vzhledem k velikosti konečných prvků v ANSYS 2019 R3.

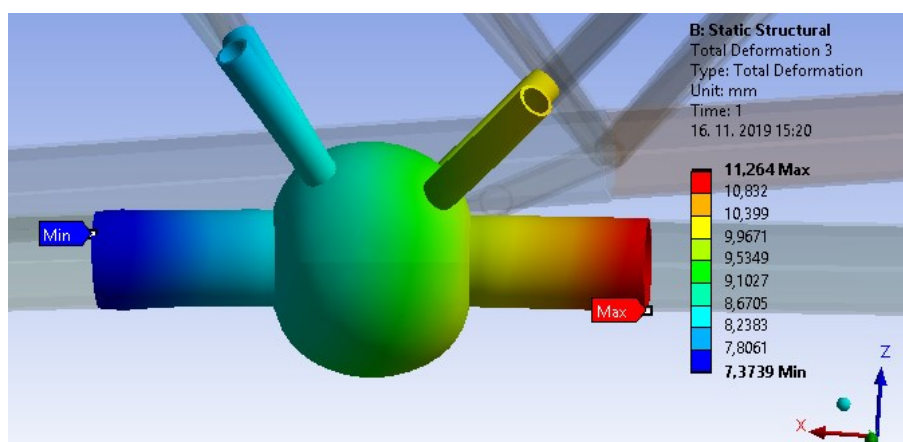


Obrázek 4.70 – Celková deformace konstrukce

Výsledky

Deformace

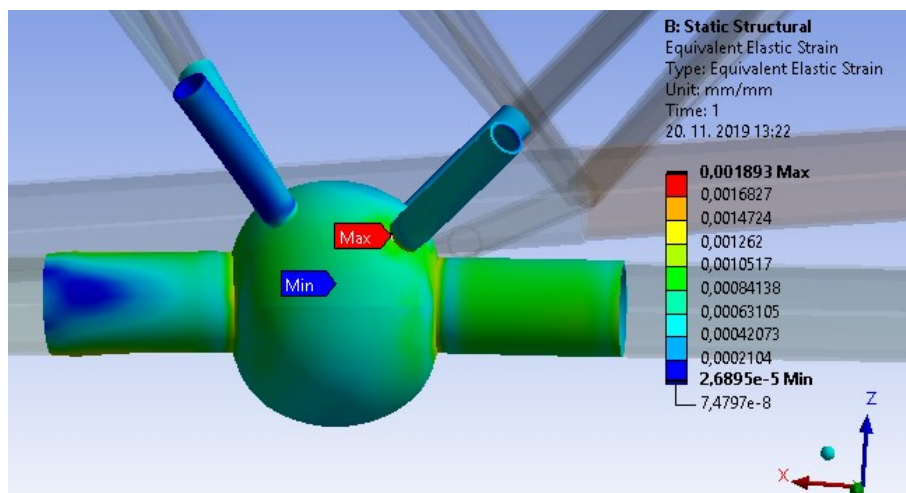
Deformace v místech duté koule je menší, než deformace jedné z trubek, pohybuje se v rozmezí 8,23 až 9,97 mm. Lze tedy konstatovat, že styčník je dostatečně tuhý pro přenos sil. Největší deformace se nachází v místě, kde se dolní tlačný pás vtlačuje do duté koule.



Obrázek 4.71 – Deformace styčníku

Poměrná ekvivalentní deformace

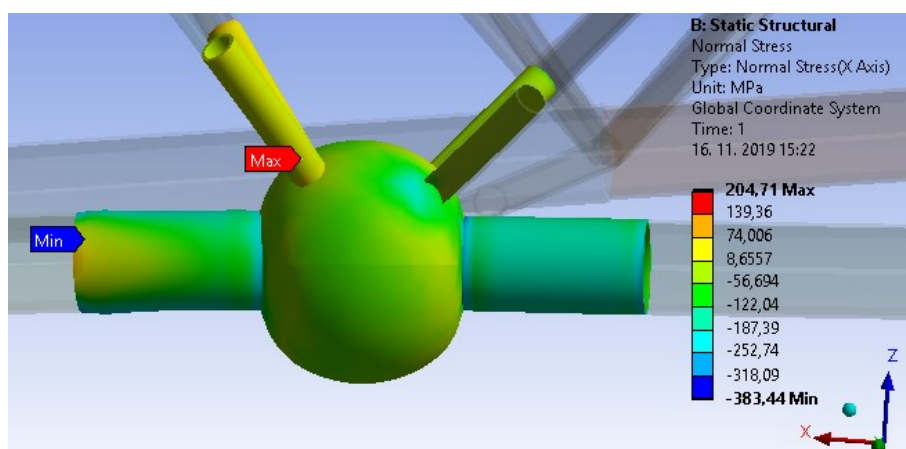
Největší poměrná deformace se nachází v místech přivaření jedné z tažených diagonál k duté kouli. Dosahuje hodnoty $1,89 \cdot 10^{-3}$ mm/mm. V ploše koule, kde nejsou trubky, se hodnoty pohybují od $2,1 \cdot 10^{-4}$ do $8,4 \cdot 10^{-4}$ mm/mm.



Obrázek 4.72 – Poměrná ekvivalentní deformace

Normálová napětí ve směru x

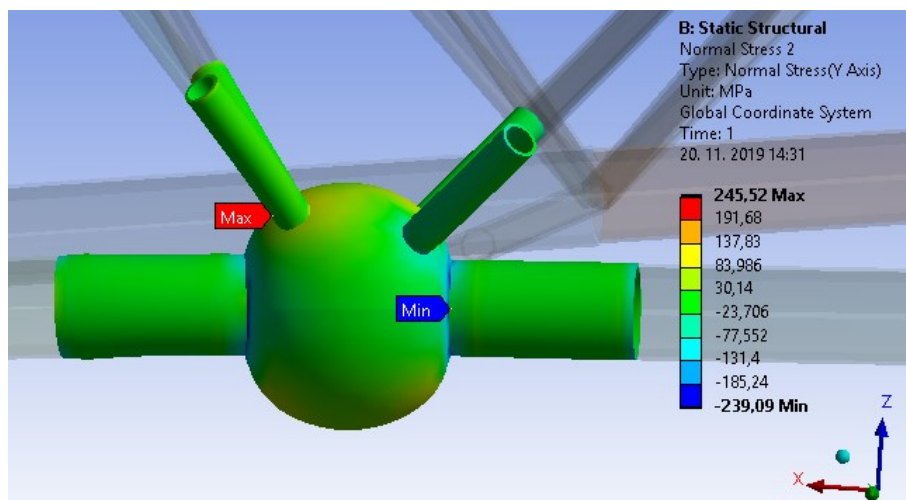
Normálové napětí ve směru osy x je na duté kouli, v místech, kde se nenachází trubky v rozmezí -120 až 8,66 MPa. Ke změně dochází v místech přivaření trubek, zde se napětí koncentruje a zvyšuje se. V místě připojení tažené diagonály je tahové napětí 204,71 MPa, u styku s tlačným dolním pásem je tlakové napětí až -383,44 MPa.



Obrázek 4.73 – Normálová napětí ve směru osy x

Normálová napětí ve směru y

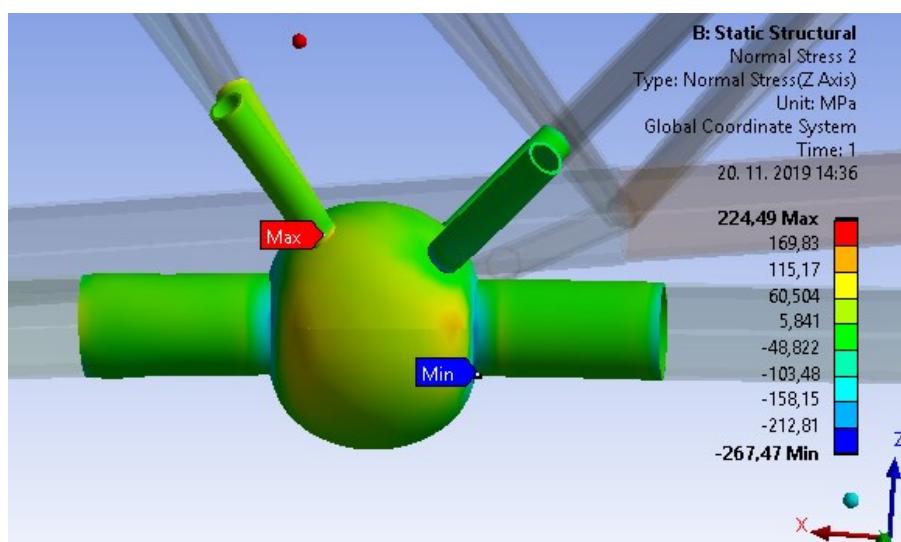
Normálové napětí ve směru osy y je na duté kouli, v místech, kde se nenachází trubky okolo -23,71 MPa. Největší koncentrace napětí je v místě styku duté koule s trubkami. U přípoje tažené diagonály je hodnota tahového napětí 245,52 MPa, u tlačného dolního pásu tlakové napětí -239,09 MPa.



Obrázek 4.74 – Normálová napětí ve směru osy y

Normálová napětí ve směru z

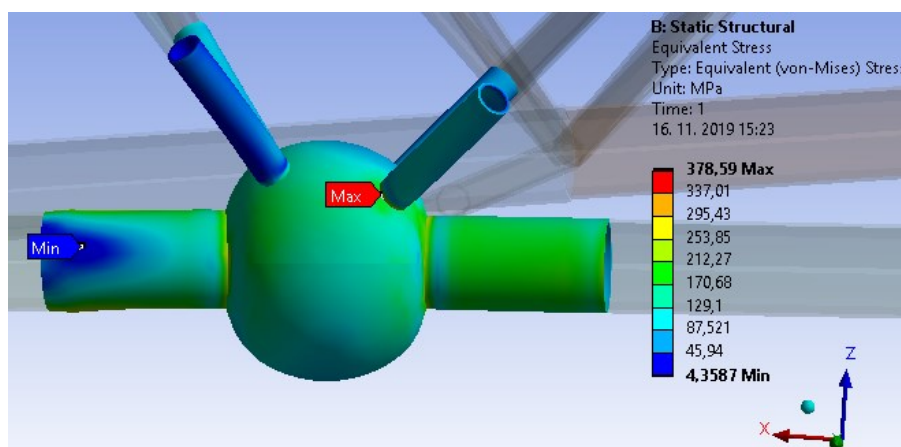
Normálové napětí ve směru osy z je na duté kouli, v místech bez trubek v rozmezí od 115,17 MPa do -48,82 MPa. Největší koncentrace tahového napětí je v místě styku duté koule s taženou diagonálou, hodnota napětí dosahuje 224,49 MPa. Maximální tlakové napětí je u přípoje tlačného dolního pásu -267,47 MPa.



Obrázek 4.75 – Normálová napětí ve směru osy z

Ekvivalentní napětí

Neboli von Misesovo napětí je v ploše duté koule od 4,36 MPa po 129,10 MPa. U přípoje dolního pásu je napětí až 378,59 MPa.



Obrázek 4.76 – Ekvivalentní napětí

Shrnutí

Po důkladné analýze lze říct, že současný návrh styčníku (průměr 400 mm, tloušťka stěn 10 mm) je pro konstrukci dostačující. Z deformací vyplývá, že se koule deformuje podobně

jako okolní pruty, což je vhodné. Ke koncentraci napětí dochází okolo míst, kde jsou přivařené trubky. Svary v těchto místech jsou navrženy minimálně na plnou (tlakovou a tahovou) únosnost trubek – viz kapitola 4.3.7 a nejsou tedy slabým místem.

4.3.7 Posouzení spojů

Posuzované spoje jsou posouzeny dle ČSN EN 1993-1-8 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčníků [5].

Dílčí součinitel spolehlivosti

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Svary v místech přivaření trubek k dutým styčnickovým koulím

Návrh svarů je proveden podle jednoduché tabulky – viz tabulka 4.21 vycházející ze vztahů 4.114 a 4.115. Vztahy i tabulka jsou odvozeny ze známých vztahů pocházejících z [5]. Návrh je proveden komplexně vždy pro jednu dimenzi průřezu. Pro každý průřez je stanovena jeho maximální možná únosnost a na tu je svar navržen. Pokud je z jakéhokoliv důvodu (např. vlivem vzpěru nebo působení ohybového momentu) únosnost konkrétního prvku menší, svar je přesto na stranu bezpečnou navržen na maximální únosnost, tzn. v prostém tlaku nebo tahu.

$$F_{v,Rd} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{Mw}} \frac{1}{\sqrt{4 \left(\frac{\sin \theta \cos 45^\circ}{a_{we} L_{we}} \right)^2 + 3 \left(\frac{\cos \theta}{a_{we} L_{we}} \right)^2}} \quad (4.114)$$

$$F_{v,Rd} = \frac{f_u a_{we} L_{we}}{\gamma_{Mw} \sin \theta \cos 45^\circ}, \quad (4.115)$$

kde je:

f_u mez pevnosti
 γ_{Mw} parciální součinitel spolehlivosti svaru

β_w korelační součinitel
 a_{we} účinná výška svaru
 L_{we} délka svaru

Tabulka 4.21 – Tabulka návrhové únosnosti koutového svaru 100 mm dlouhého zatíženého pod úhlem θ , hodnoty v kN

Parciální součinitel spolehlivosti		$\gamma_{Mw} = 1,50$									
Účinná výška svaru	a_{we}	mm	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ocel	θ										
S 235 (Fe 360) $\beta_w = 0,80$	0°		52,0	69,3	86,6	103,9	121,2	138,6	155,9	173,2	190,5
	15°		52,6	70,1	87,6	105,1	122,6	140,1	157,7	175,2	192,7
	30°		54,3	72,4	90,5	108,5	126,6	144,7	162,8	180,9	199,0
	45°		56,9	75,9	94,9	113,8	132,8	151,8	170,8	189,7	208,7
	60°		60,0	80,0	100,0	120,0	140,0	160,0	180,0	200,0	220,0
	75°		62,6	83,5	104,3	125,2	146,1	166,9	187,8	208,7	229,5
	90°		63,6	84,9	106,1	127,3	148,5	169,7	190,9	212,1	233,3
S 275 (Fe 430) $\beta_w = 0,85$	0°		58,4	77,9	97,4	116,8	136,3	155,8	175,2	194,7	214,2
	15°		59,1	78,8	98,5	118,2	137,8	157,5	177,2	196,9	216,6
	30°		61,0	81,3	101,7	122,0	142,4	162,7	183,0	203,4	223,7
	45°		64,0	85,3	106,6	128,0	149,3	170,6	192,0	213,3	234,6
	60°		67,5	89,9	112,4	134,9	157,4	179,9	202,4	224,8	247,3
	75°		70,4	93,8	117,3	140,7	164,2	187,7	211,1	234,6	258,0
	90°		71,5	95,4	119,2	143,1	166,9	190,8	214,6	238,5	262,3
S 355 (Fe 510) $\beta_w = 0,90$	0°		65,4	87,2	109,1	130,9	152,7	174,5	196,3	218,1	239,9
	15°		66,2	88,2	110,3	132,4	154,4	176,5	198,5	220,6	242,6
	30°		68,3	91,1	113,9	136,7	159,5	182,2	205,0	227,8	250,6
	45°		71,7	95,6	119,5	143,4	167,2	191,1	215,0	238,9	262,8
	60°		75,6	100,7	125,9	151,1	176,3	201,5	226,7	251,9	277,0
	75°		78,8	105,1	131,4	157,7	183,9	210,2	236,5	262,8	289,0
	90°		80,1	106,9	133,6	160,3	187,0	213,7	240,4	267,1	293,8

Poznámka: Tabulka platí pro materiály o tloušťce menší než 40 mm.

Tabulka 4.22 – Návrh svarů a jejich únosností

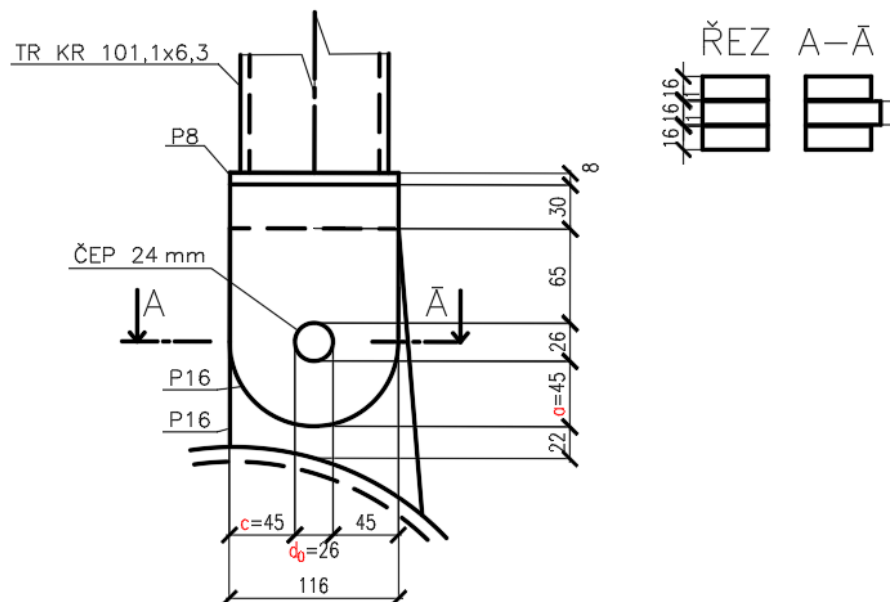
Profil	Obvod trubky O [mm]	Průřezová plocha A [mm ²]	Únosnost trubky v prostém tlaku a tahu $N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$ [kN] (4.109)	Nutná účinná výška svaru a_{we} [mm]	Skutečná únosnost svaru $F_{v,Rd}$ [kN]
168,3 x 6,3	528,73	3206,31	753,48	7	785,16
159 x 6,3	499,51	3022,24	710,23	7	741,77
127 x 6,3	398,98	2388,90	561,39	7	591,77
114,3 x 6,3	359,08	2137,54	502,32	7	533,23
101,6 x 6,3	319,19	1886,18	443,25	7	474,00

76,1 x 6,3	239,08	1381,48	324,65	7	355,03
63,5 x 6,3	199,49	1132,10	266,04	7	296,24
60,3 x 6,3	189,44	1068,77	251,16	7	281,32
57 x 6,3	179,07	1003,46	235,81	7	265,92
54 x 6,3	169,65	944,08	221,86	7	251,93

Ukotvení táhla k zemi

Jedná se o dvoustřížný čepový spoj – viz obrázek 4.14.

Geometrie



Obrázek 4.77 – Základní geometrie spoje

Posouzení čepového spoje

Kombinace zatížení pro největší normálovou (tahovou) a příslušnou (zároveň také největší) posouvající sílu:

$$1,35 \cdot \text{vlastní tíha} + 1,35 \cdot \text{stálé} + 0,75 \cdot \text{sníh} + 1,5 \cdot \text{vítr ve směru 1 (tlak)}$$

Největší normálová tahová síla

$$N_{Ed^+} = 113,1 \text{ kN}$$

Největší (příslušná) posouvající síla

$$V_{Ed} = 0,38 \text{ kN}$$

Návrhová smyková síla v čepu

$$F_{v,Ed} = N_{Ed^+} = 113,1 \text{ kN}$$

Návrhová síla v otlacení

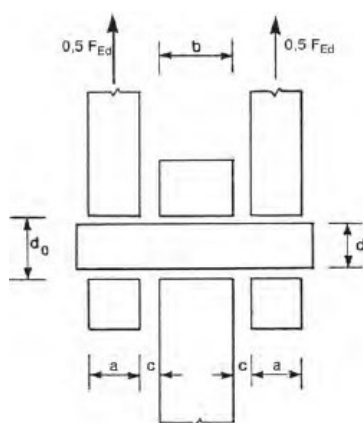
$$F_{b,Ed} = N_{Ed^+} = 113,1 \text{ kN}$$

Tloušťka všech tří plechů

$$t = 0,016 \text{ m}$$

Návrhový ohybový moment

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed^+}}{8} (b + 4c + 2a) = \frac{113,1}{8} (0,016 + 4 \cdot 0,001 + 2 \cdot 0,016) = 0,74 \text{ kNm} \quad (4.116)$$



Obrázek 4.78 – Geometrické rozměry pro výpočet ohybového momentu

Průměr čepu

$$d = 0,024 \text{ m}$$

Průměr otvoru pro čep

$$d_o = 0,026 \text{ m}$$

Plocha průřezu čepu

$$A_{\check{c}} = 4,52 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Elastický modul průřezu čepu

$$W_{el,\check{c}} = \pi \cdot d^3 / 32 = \pi \cdot 24^3 / 32 = 1357,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (4.117)$$

Čep pevnosti 6.8

Mez pevnosti čepu

$$f_{up} = 600 \text{ MPa}$$

Mez kluzu čepu

$$f_{yp} = 480 \text{ MPa}$$

Kontrola geometrických rozměrů dle typu A

$$a = 45 \text{ mm} \geq \frac{N_{Ed^+} \cdot \gamma_{M0}}{2t \cdot f_y} + \frac{2d_0}{3} = \frac{113,1 \cdot 10^3 \cdot 1}{2 \cdot 16 \cdot 235} + \frac{2 \cdot 26}{3} = 32,37 \text{ mm} \quad (4.118)$$

→ vyhovuje

$$c = 45 \text{ mm} \geq \frac{N_{Ed^+} \cdot \gamma_{M0}}{2t \cdot f_y} + \frac{d_0}{3} = \frac{113,1 \cdot 10^3 \cdot 1}{2 \cdot 16 \cdot 235} + \frac{26}{3} = 23,71 \text{ mm} \quad (4.119)$$

→ vyhovuje

Únosnost čepu ve střihu

Únosnost je možno vynásobit dvěma, jedná se o dvoustřížný spoj

$$F_{v,Rd} = 0,6 A_{\check{c}} \frac{f_{up}}{\gamma_{M2}} = 2 \cdot 0,6 \cdot 452 \frac{600 \cdot 10^{-3}}{1,25} = 260,35 \text{ kN} \geq \quad (4.120)$$

$$\geq F_{v,Ed} = 113,1 \text{ kN} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Únosnost plechu a čepu v otláčení

$$F_{b,Rd} = 1,5 t d \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1,5 \cdot 16 \cdot 24 \frac{235 \cdot 10^{-3}}{1,00} = 135,36 \text{ kN} \geq \quad (4.121)$$

$\geq F_{b,Ed} = 113,1 \text{ kN} \rightarrow$ vyhovuje

Únosnost čepu v ohybu

$$M_{Rd} = 1,5 W_{el,\check{c}} \frac{f_{yp}}{\gamma_{M0}} = 1,5 \cdot 1357,17 \frac{480 \cdot 10^{-6}}{1,00} = 0,98 \text{ kNm} \geq M_{Ed} = 0,74 \text{ kNm} \quad (4.122)$$

\rightarrow vyhovuje

Posouzení styčnickového plechu

Průřezová plocha

$$A_{net} = 1,68 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Plocha oslabeného průřezu

$$A_{net} = 0,016 \cdot 0,116 - 0,026 \cdot 0,016 = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (4.123)$$

Moment setrvačnosti oslabeného průřezu pro směr vybočení

$$I_y = 3,0720 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

Posouzení na tah

Kombinace zatížení pro největší normálovou (tahovou) sílu:

$$1,35 \cdot \text{vlastní tíha} + 1,35 \cdot \text{stálé} + 0,75 \cdot \text{sníh} + 1,5 \cdot \text{vítr ve směru 1 (tlak)}$$

Největší normálová tahová síla

$$N_{Ed}^+ = 113,1 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost v tahu průřezu oslabeného dírami pro spojovací prostředky

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{1,44 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^3}{1,25} = 270,72 \text{ kN} \quad (4.124)$$

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed^+}}{N_{u,Rd}} = \frac{113,1}{270,72} = 0,42 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (4.125)$$

Posouzení na vzpěrný tlak

Kombinace zatížení pro největší normálovou (tlakovou) sílu:

1 . vlastní tíha + 1 . stálé + 1,5 . vítr ve směru 1 (sání)

Největší normálová tlaková síla

$$N_{Ed} = 68,94 \text{ kN}$$

Vzpěrná délka

$$L_{cr} = x = 0,067 \text{ m}$$

Pružná kritická síla určená pro vlastnosti plného průřezu pro příslušný způsob vybočení

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 3,072 \cdot 10^{-8}}{0,067^2} = 14183,74 \text{ kN} \quad (4.71)$$

Poměrná štíhlost prutu pro příslušný způsob vybočení

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{1,68 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^6}{14183,74 \cdot 10^3}} = 0,167 \quad (4.73)$$

Křivka vzpěrné pevnosti c , součinitel imperfekce $\alpha = 0,49$

Hodnota pro výpočet součinitele vzpěrnosti pro příslušný způsob vybočení

$$\phi_y = 0,5[1 + \alpha (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5[1 + 0,49(0,167 - 0,2) + 0,167^2] = 0,506 \quad (4.75)$$

Součinitel vzpěrnosti pro příslušný způsob vybočení

$$\kappa_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,506 + \sqrt{0,506^2 - 0,167^2}} = 1,017 \quad (4.77)$$

→ dále uvažováno s hodnotu 1,000

Návrhová vzpěrná únosnost tlačeneho prvku pro příslušný způsob vybočení

$$N_{b,Rd,y} = \frac{\kappa_y \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{1,000 \cdot 1,68 \cdot 10^{-3} \cdot 235 \cdot 10^3}{1} = 394,80 \text{ kN} \quad (4.79)$$

Využití průřezu

$$\frac{N_{Ed}^-}{N_{b,Rd}} = \frac{68,94}{394,80} = 0,17 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (4.36)$$

Svar mezi styčnickovým plechem a půlkoulí zakotvenou do země

Kombinace zatížení pro největší normálovou (tahovou) sílu:

1,35 · vlastní tíha + 1,35 · stálé + 0,75 · sníh + 1,5 · vítr ve směru 1 (tlak)

Největší normálová tahová síla

$$N_{Ed}^+ = 113,1 \text{ kN}$$

Největší (příslušná) posouvající síla

$$V_{Ed} = 0,38 \text{ kN}$$

Výsledná síla působící na svar

$$F_{Ed} = \sqrt{N_{Ed}^{+2} + V_{Ed}^2} = \sqrt{113,1^2 + 0,38^2} = 113,1 \text{ kN} \quad (4.126)$$

Délka svaru (svar je proveden z obou stran plechu)

$$L_{we} = 0,232 \text{ m}$$

Účinná výška svaru (návrh proveden dle tabulky 4.21, úhel zatížení svaru θ je zjednodušeně uvažován 90°)

$$a_{we} = 3 \text{ mm}$$

Skutečná únosnost svaru

$$F_{v,Rd} = 63,6 \cdot \frac{232}{100} = 147,55 \text{ [kN]} \quad (4.127)$$

Ukotvení táhla v jeho horní části je provedeno obdobným způsobem, dimenze jednotlivých komponentů je stejná jako v dolní části.

Ukotvení stropnice k hornímu pásu

Přípoj je proveden koutovým svarem po celém obvodu kromě horní strany horní příruby



Obrázek 4.79 – Ukázka svarového připojení stropnice k hornímu pásu

Kombinace zatížení pro největší normálovou i posouvající sílu:

$1,35 \cdot \text{vlastní tíha} + 1,35 \cdot \text{stálé} + 0,75 \cdot \text{sníh} + 1,5 \cdot \text{vítr ve směru 1 (tlak)}$

Největší normálová síla

$$N_{Ed} = 43,66 \text{ kN}$$

Největší posouvající síla

$$V_{Ed} = 6,49 \text{ kN}$$

Výsledná síla působící na svar

$$F_{Ed} = \sqrt{N_{Ed}^2 + V_{Ed}^2} = \sqrt{43,66^2 + 6,49^2} = 44,14 \text{ kN} \quad (4.126)$$

Délka svaru

$$L_{we} = 0,348 \text{ m}$$

Úhel zatížení svaru

$$\theta = 81,5^\circ$$

Účinná výška svaru (návrh proveden dle tabulky 4.21)

$$a_{we} = 3 \text{ mm}$$

Skutečná únosnost svaru

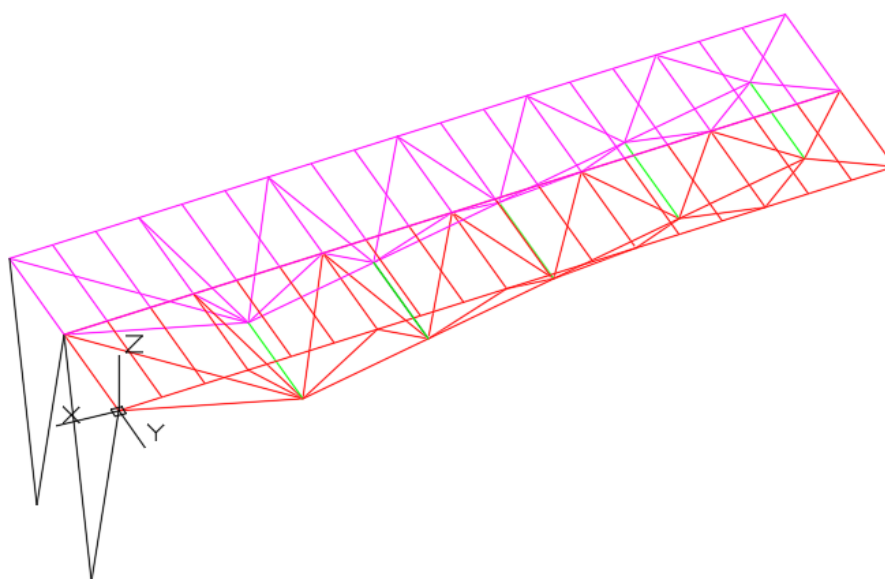
$$F_{v,Rd} = \left[63,6 - \frac{(63,6 - 62,6) \cdot (90 - 81,5)}{15} \right] \cdot \frac{348}{100} = 219,36 \text{ [kN]} \quad (4.128)$$

4.4 Montážní a technologický postup

Tribuna se řadí do třídy následků CC3 (velké následky s ohledem na ztráty lidských životů nebo velmi významné následky ekonomické, sociální nebo pro prostředí). Při montáži je potřeba dbát velké přesnosti a bezpečnosti práce. Výroba i montáž musí být prováděna odbornou firmou s kvalifikovanými pracovníky. Při montáži a dopravě je nutno zohlednit a respektovat statickou funkci jednotlivých dílců. Válcovaný materiál musí odpovídat normám ČSN EN 10025-1: Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 1: Všeobecné technické dodací podmínky [6]. Ocelová konstrukce musí být opatřena vhodnou povrchovou úpravou.

Polohy všech stěžejních bodů konstrukce jsou na počátku i průběžně během výstavby zaměřovány geodetem. Před samotnou montáží ocelové konstrukce je nutno osadit podpory. V dostatečném předstihu (minimálně 28 dní, pokud se nepoužít speciální přísady pro urychlení nárůstu pevnosti betonu) musí být vybetonovány železobetonové sloupy spojené v hlavě. Sloupy musí být přichystány pro kotvení ocelové konstrukce. Na tyto železobetonové prvky je potřeba osadit roznášecí plech a kotevní prvky. Dále je potřeba mít přichystánu zabetonovanou část detailu pro zakotvení táhel do země. V tuto chvíli je možno započít montáž samotné ocelové konstrukce. Pomocí jeřábu se vždy osadí na jednu podporu montážní dílec tvořený jedním dolním pásem s diagonálami na každou stranu, dvěma horními pásy, stropnicemi a nachystanými částmi styčníků – viz obrázek 4.80 (červeně). Identický postup se provede se sousedním dílcem – viz obrázek 4.80 (fialově). Každý z těchto dílců váží přibližně 1940 kg a je nutno osadit jej pomocí těžké techniky. Vhodným jeřábem je například

typ Terrex CBR28 plus s délkou vyložení 28 m a nosností 2500 kg. Každý z dílců se při manipulaci musí na jeřáb vhodně zavěsit. Jeden závěs se naváže v místě prvního styčnicku na dolním pásu (tedy ve střetu trubek 76,1 x 6,3 a 159 x 6,3), druhý na třetím styčnicku dolního pásu (střet trubek 60,3 x 6,3 mm). Další dva závěsy slouží pro vyrovnaní stability a zamezení překlopení dílce. Umístí se do čtvrtého styčnicku na obou horních páslech (střet trubek 63,5 x 6,3 a 60,3 x 6,3). Po osazení dílců do své přesné pozice je nutno je podepírat lešením a zamezit tak jakémukoliv pohybu. Horní pásy se propojí šroubovým přípojem. V tuto chvíli se přistoupí k montáži trubek spojující dolní pásy – viz obrázek 4.80 (zeleně). Nejtěžší z prvků váží přibližně 32 kg, je možné jej tedy zvednout bez pomoci jeřábu. Tento styk je proveden montážním svarem a je zde kladen zvýšený nárok na bezpečnost a morálku práce. Nyní se šroubově osadí táhla do předem přichystaných detailů – viz obrázek 4.80 (černě). Hmotnost jednoho táhla je asi 93 kg. Ani zde již není jeřáb nutností. Až po jejich dotažení a rektifikování všech detailů, provedení vizuální prohlídky a ujištění se, že je vše provedeno dle dokumentace, se konstrukce stává nosnou a je možné odstranit lešení. Identický postup se opakuje u všech dílců na konstrukci. Nyní se osadí krytina v podobě trapézového plechu. Při osazení je potřeba dbát řádnému kotvení k nosné prutové konstrukci a dodržovat předpisy výrobce plechu. Na závěr se osadí příslušenství zastřešení (okapy apod.) Jedná se o konvekční metodu, kdy jsou zvedány jednotlivé části (bloky). Při užívání stavby je nutno provádět pravidelné prohlídky zodpovědnou osobou. Případné nalezené nedostatky je potřeba odstranit.



Obrázek 4.80 – Barevně rozlišené schéma jednotlivých montážních dílců

5 Závěr

V rámci této diplomové práce byl popsán princip a působení prostorových příhradových konstrukcí. Práce obsahuje důvody využití těchto konstrukcí, jejich historii, typy, konstrukční metody a zaměřuje se na popis specifických částí příhradových konstrukcí – styčníků.

Konkrétní reálnou konstrukcí, která byla hodnocena, je zastřešení tribuny městského stadionu STARS v Třinci. Byly popsány zásady dispozičního návrhu tribun i možné architektonické varianty řešení zastřešení. Stěžejní částí celé práce je statický výpočet této konstrukce. Výpočet obsahuje výpočet všech účinků zatížení, vytvoření numerického modelu, posouzení pomocí software i ruční posouzení prvků, kterému předchází nalezení vnitřních sil. Výsledky ručního i automatického výpočtu jsou velmi podobné. Posouzení bylo provedeno dle mezního stavu únosnosti i použitelnosti. Při návrhu a posudku byl brán zřetel na ekonomické a hospodárné využití materiálu, ale také na architektonické požadavky. Byl popsán rozdíl mezi lineárním a nelineárním výpočtem. Součástí statického výpočtu je i posouzení vybraných spojů. Veškeré posudky se ukázaly jako vyhovující. Specifickým detailem této konstrukce jsou styčníky tvořené dutými koulemi. Vybraný styčník byl analyzován numerickým modelem. Popsán je i montážní a technologický postup prací zhotovení zastřešení. Součástí práce je také výkresová dokumentace obsahující dispoziční výkres dílců, půdorysný výkres, řezy a výkresy detailů.

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat všem, kteří mi byli jakoukoliv cestou nápomocni při tvorbě této mé diplomové práce. Především pak panu Ing. Miroslavu Rosmanitovi, Ph.D. za jeho ochotu, vstřícnost, profesionální rady a podněty, které mi pomohly práci zdárně vytvořit.

6 Seznam obrázků

Obrázek 2.1 – Rovinná příhradová konstrukce	10
Obrázek 2.2 – Prostorová příhradová konstrukce	10
Obrázek 2.3 – Výjimečný případ, kdy přes platnost vzorce 2.1 není konstrukce staticky určitá	11
Obrázek 2.4 – Zvětšení příhradové konstrukce	12
Obrázek 2.5 – Schématická ukázka kupole	13
Obrázek 2.6 – Příklady různého uspořádání a tvaru roštů	14
Obrázek 2.7 – Nejčastěji používané typy skládaných deskových konstrukcí	15
Obrázek 2.8 – Příklady tvarů zakřivených konstrukcí	16
Obrázek 2.9 – Ukázka montáže pomocí lešení	18
Obrázek 2.10 – Zvedání bloku při montáži	19
Obrázek 2.11 – Zvedání kupole, které je technicky poměrně náročné	20
Obrázek 2.12 – Proces vztyčování metodou postupného zvedání	21
Obrázek 2.13 – Základní prvek nůžkového systému	22
Obrázek 2.14 – Rozložitelná valená klenba	23
Obrázek 2.15 – Kupole před a po rozložení	24
Obrázek 2.16 – Proces rozkládání kupole	24
Obrázek 2.17 – Příklady adaptivních konstrukcí, které se obvykle přizpůsobí Gaussovým křivkám	25
Obrázek 2.18 – Příklady základních používaných styčníků	26
Obrázek 2.19 – Příklady možných ukončení profilů připojovaných ke styčníkům	27
Obrázek 2.20 – Typ KK-Ball	28
Obrázek 2.21 – Typ NK-Bowl	28
Obrázek 2.22 – Styčník Triodetic	29
Obrázek 2.23 – Styčník Nodus	30
Obrázek 3.1 – Schéma vysvětlující vzorec pro výpočet C -value (C)	32
Obrázek 4.1 – Konstrukce zastřešení městského stadionu STARS v Třinci	34
Obrázek 4.2 – Schéma zastřešení a jeho orientace vůči sedadlovému prostoru a okolnímu terénu	34
Obrázek 4.3 – Varianta A – Schéma výřezu zastřešení, viz řešení městského stadionu v Třinci	35

Obrázek 4.4 – Varianta B – Schéma výřezu zastřešení rovinným roštem	36
Obrázek 4.5 – Varianta C – Schéma výřezu zastřešení zakřiveným roštem	37
Obrázek 4.6 – Varianta D – Schéma výřezu zastřešení pomocí nosníků tvořícího rám	38
Obrázek 4.7 – Schéma směrů působícího zatížení větrem na jeden dílec	41
Obrázek 4.8 – Schéma zvýraznění zatěžovaného dílce při zatížení větrem	41
Obrázek 4.9 – Schéma výsledných použitých oblastí pro jednotlivé směry (+ značí tlak, - sání)	46
Obrázek 4.10 – Schéma z [3]	47
Obrázek 4.11 – Uvažované schéma z [3]	48
Obrázek 4.12 – Kloubové spojení prutů	51
Obrázek 4.13 – Kloubová podpora	51
Obrázek 4.14 – Kotvení táhel	51
Obrázek 4.15 – Návaznost dílců	51
Obrázek 4.16 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	53
Obrázek 4.17 – Vnitřní síly (normálové) na táhlech pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	55
Obrázek 4.18 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru y) na táhlech pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	56
Obrázek 4.19 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru z) na táhlech pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	56
Obrázek 4.20 – Vyznačení rozměrů kruhových trubek potřebných pro zatřídění průřezu	57
Obrázek 4.21 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	65
Obrázek 4.22 – Vnitřní síly (normálové) na diagonálách pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	67
Obrázek 4.23 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru y) na diagonálách pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	67
Obrázek 4.24 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru z) na diagonálách pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	68
Obrázek 4.25 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	76
Obrázek 4.26 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	77
Obrázek 4.27 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	78
Obrázek 4.28 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	79
Obrázek 4.29 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	80
Obrázek 4.30 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	82

Obrázek 4.31 – Vnitřní síly (normálové) na dolních pásech pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	83
Obrázek 4.32 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru y) na dolních pásech pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	84
Obrázek 4.33 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	92
Obrázek 4.34 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	93
Obrázek 4.35 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	94
Obrázek 4.36 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	96
Obrázek 4.37 – Vnitřní síly (normálové) na prutu spojující dolní pásy pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	97
Obrázek 4.38 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru y) na prutu spojující dolní pásy pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	98
Obrázek 4.39 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru z) na prutu spojující dolní pásy pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	98
Obrázek 4.40 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	107
Obrázek 4.41 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	108
Obrázek 4.42 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	109
Obrázek 4.43 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	110
Obrázek 4.44 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	111
Obrázek 4.45 – Vnitřní síly (normálové) na stropnici pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	113
Obrázek 4.46 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru y) na stropnici pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	113
Obrázek 4.47 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru z) na stropnici pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	114
Obrázek 4.48 – Vyznačení rozměrů U profilů potřebných pro zatřídění průřezu	114
Obrázek 4.49 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	125
Obrázek 4.50 – Vnitřní síly (normálové) na průběžném horním pásu pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	126
Obrázek 4.51 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru y) na průběžném horním pásu pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	126
Obrázek 4.52 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru z) na průběžném horním pásu pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	127

Obrázek 4.53 – Vnitřní síly (posouvající síly ve směru y) na průběžném horním pásu pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	127
Obrázek 4.54 – Vnitřní síly (posouvající síly ve směru z) na průběžném horním pásu pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	128
Obrázek 4.55 – Automatický posudek využití průřezu dle Scia Engineer 18.1	130
Obrázek 4.56 – Vnitřní síly (normálové) na krajním horním pásu pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	131
Obrázek 4.57 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru y) na krajním horním pásu pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	131
Obrázek 4.58 – Vnitřní síly (ohybové momenty ve směru z) na krajním horním pásu pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	132
Obrázek 4.59 – Vnitřní síly (posouvající síly ve směru y) na krajním horním pásu pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	132
Obrázek 4.60 – Vnitřní síly (posouvající síly ve směru z) na krajním horním pásu pro kombinaci zatížení nejvíce využívající průřez	133
Obrázek 4.61 – Svislá deformace konstrukce	135
Obrázek 4.62 – Schéma konstrukce s vyznačením délky pro posudek MSP	135
Obrázek 4.63 – Zjednodušené schéma konstrukce pro ověření výpočtu průhybu	136
Obrázek 4.64 – Schéma konstrukce s vyznačením míst a průřezů pro výpočet momentu setrvačnosti I	137
Obrázek 4.65 – Ukázka nalezení momentu setrvačnosti I pomocí Scia Engineer 18.1	137
Obrázek 4.66 – Deformace konstrukce vypočtené na 3D modelu zatíženém třemi silami na volném konci velikosti 1 kN	137
Obrázek 4.67 – Analyzovaný styčník z duté koule	138
Obrázek 4.68 – Modelovaný styčník (červené vyznačení)	139
Obrázek 4.69 – Ukázka části sítě konečných prvků	140
Obrázek 4.70 – Celková deformace konstrukce	141
Obrázek 4.71 – Deformace styčníku	141
Obrázek 4.72 – Poměrná ekvivalentní deformace	142
Obrázek 4.73 – Normálová napětí ve směru osy x	142
Obrázek 4.74 – Normálová napětí ve směru osy y	143
Obrázek 4.75 – Normálová napětí ve směru osy z	144
Obrázek 4.76 – Ekvivalentní napětí	144
Obrázek 4.77 – Základní geometrie spoje	147

Obrázek 4.78 – Geometrické rozměry pro výpočet ohybového momentu	148
Obrázek 4.79 – Ukázka svarového připojení stropnice k hornímu pásu	153
Obrázek 4.80 – Barevně rozlišené schéma jednotlivých montážních dílců	155

7 Seznam tabulek

Tabulka 4.1 – Součinitelé plnosti	45
Tabulka 4.2 – Tlak větru	45
Tabulka 4.3 – Výpočet zatížení větrem	46
Tabulka 4.4 – Posudek na vzpěr pomocí Scia Engineer 18.1	54
Tabulka 4.5 – Posudek na ohyb s osovým tlakem pomocí Scia Engineer 18.1	54
Tabulka 4.6 – Interakční součinitelé podle metody 2 získané ze Scia Engineer 18.1	64
Tabulka 4.7 – Posudek na vzpěr pomocí Scia Engineer 18.1	66
Tabulka 4.8 – Posudek na ohyb s osovým tlakem pomocí Scia Engineer 18.1	66
Tabulka 4.9 – Interakční součinitelé podle metody 2 získané ze Scia Engineer 18.1	75
Tabulka 4.10 – Posudek na vzpěr pomocí Scia Engineer 18.1	82
Tabulka 4.11 – Posudek na ohyb s osovým tlakem pomocí Scia Engineer 18.1	82
Tabulka 4.12 – Interakční součinitelé podle metody 2 získané ze Scia Engineer 18.1	91
Tabulka 4.13 – Posudek na vzpěr pomocí Scia Engineer 18.1	96
Tabulka 4.14 – Posudek na ohyb s osovým tlakem pomocí Scia Engineer 18.1	96
Tabulka 4.15 – Interakční součinitelé podle metody 2 získané ze Scia Engineer 18.1	106
Tabulka 4.16 – Posudek na vzpěr pomocí Scia Engineer 18.1	111
Tabulka 4.17 – Posudek na ohyb s osovým tlakem pomocí Scia Engineer 18.1	112
Tabulka 4.18 – Interakční součinitelé podle metody 2 získané ze Scia Engineer 18.1	124
Tabulka 4.19 – Posudek na kombinaci ohybu, osově a smykové síly pomocí Scia Engineer 18.1	125
Tabulka 4.20 – Posudek na kombinaci ohybu, osově a smykové síly pomocí Scia Engineer 18.1	130
Tabulka 4.21 – Tabulka návrhové únosnosti koutového svaru 100 mm dlouhého zatíženého pod úhlem θ , hodnoty v kN	146
Tabulka 4.22 – Návrh svarů a jejich únosností.....	146

8 Použitá literatura

- [1] ČSN EN 1991-1-1 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. ČNI, 2004.
- [2] ČSN EN 1991-1-3 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem*. ČNI, 2013.
- [3] ČSN EN 1991-1-3 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. ČNI, 2013.
- [4] ČSN EN 1993-1-1 *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. ČNI, 2011.
- [5] ČSN EN 1993-1-8 *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčníků*. ČNI, 2011.
- [6] ČSN EN 10025-1: *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 1: Všeobecné technické dodací podmínky*. ČNI, 2005.
- [7] MERO Node Systems. *MERO-TSK* [online]. Würzburg: MERO-TSK International GmbH & Co., 2018 [cit. 2019-09-30]. Dostupné z: <https://www.mero.de/index.php/en/construction-systems/nodes>
- [8] Systems: Nodus System. *Structure And Form Analysis System* [online]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2011 [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: https://www.setareh.arch.vt.edu/safas/010_system_06_nodus.html
- [9] HLADÍK, Pavel. *Navrhování tribun sportovních staveb* [online]. Květen 2012, , 1-9 [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: http://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-5-03_0.pdf

- [10] HEWEN, Li. *Shape formation of space trusses* [online]. Wollongong, 1997 [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=2265&context=theses>. Disertace. University of Wollongong.

9 Použité grafické a výpočtové programy

Scia Engineer 18.1 (studentská verze)

ANSYS 2019 R3 (studentská verze)

AutoCAD Architecture 2017

Microsoft Office Word 2010

Microsoft Office Excel 2010

10 Seznam příloh

Příloha č. 1: Celkový schématický půdorys, M 1:250

Příloha č. 2: Půdorys opakujícího se dílce D_1 , M 1:25

Příloha č. 3: Pohled A_1 na dílec D_1 , M 1:25

Příloha č. 4: Pohled A_2 na dílec D_1 , M 1:25

Příloha č. 5: Detail B_1 – kotvení táhla, M 1:8

Příloha č. 6: Detail B_2 – kloubová podpora, M 1:8